

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2018**

**Bc. Jiří Beseda**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

*Řízení vnitřních osvětlovacích soustav na konstantní hladinu  
osvětlenosti*

*Controlling of indoor lighting systems at a constant level of  
illuminance*

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jiří Beseda**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Řízení vnitřních osvětlovacích soustav na konstantní hladinu  
osvětlenosti  
Controlling of indoor lighting systems at a constant level of illuminance

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Stmívatelné předřadníky.
2. Snímače osvětlení.
3. Komunikační standardy pro řízení osvětlovacích soustav.
4. Návrh říditelné osvětlovací soustavy.
5. Optimalizace typů a umístění snímačů osvětlení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha, 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)
- [5] [www.csorsostrava.cz](http://www.csorsostrava.cz) [1]

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Hrbáč, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *23. dubna 2018*



podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Valíčkovi za ochotu a vstřícnost při konzultacích a také VŠB – TU Ostrava za poskytnuté zázemí nezbytné pro tvorbu diplomové práce.

## **Abstrakt**

Náplní diplomové práce je určení vhodné kombinace umístění senzoru osvětlení a jeho přijímací charakteristiky pro regulaci osvětlovací soustavy na konstantní hladinu osvětlenosti.

Teoretická část popisuje principy elektronických předřadníků pro zářivkové a LED světelné zdroje, principy senzorů osvětlení a také základní využívané způsoby komunikace mezi senzorem a svítidlem. V praktické části je popsána tvorba výpočetního modelu, jeho vlastnosti a výsledky simulace jednotlivých pozic a jejich přijímacích charakteristik. Výsledky jsou strukturovány do hodnotících bloků podle posouzení ideální polohy, vhodné přijímací charakteristiky, energetické náročnosti jednotlivých variant, minimální osvětlenosti a rovnoměrnosti. Posledním bodem je ukázka vlivu změny odraznosti povrchů na regulaci a následné zhodnocení zjištěných faktů.

## **Klíčová Slova**

Regulace, osvětlovací soustava, elektronický předřadník, osvětlenost, DALI, KNX, komunikace, Wils,

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to determine the appropriate combination of placing a lighting sensor and reception characteristics for the regulation of an illumination system at a constant level of illumination.

The theoretical part reveals the principles of electronic ballasts used for fluorescent and LED light sources, the principles of lighting sensors as well as basic methods used for communication between the sensor and a light fitting. The practical part describes the development of the computational model, its characteristics and outcomes of simulation of individual positions and their reception characteristics. The results are structured in the evaluation blocks according to the ideal position, appropriate reception characteristic, energy performance of individual variants, minimum illumination and evenness. The last point is devoted to illustrating the influence of a surface reflection change on regulation and following evaluation of established facts.

## **Key Words**

Regulation, lighting system, electronic ballast, illuminance, DALI, KNX, communication, Wils

## Seznam některých použitých symbolů a zkratek

### Seznam použitých symbolů a veličin

U	(V)	Elektrické napětí
I	(A)	Elektrický proud
f	(Hz)	Frekvence
L	(H)	Indukčnost
X <sub>L</sub>	(Ω)	Indukční reaktance
ω	(rad·s <sup>-1</sup> )	Úhlová rychlost
R	(Ω)	Elektrický odpor
Š	(mm)	Šířka
V	(mm)	Výška
H	(mm)	Hloubka
E	(lx)	Osvětlenost
L	(cd·m <sup>-2</sup> )	Jas
P	(W)	Příkon
Ω	(sr)	Prostorový úhel
D	(%)	Činitel denního osvětlení

### Seznam použitých zkratek

E27	Druh šroubovací patice pro světelné zdroje
MOSFET	Elektrickým polem řízený tranzistor
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem pro velké výkony
DSI	Komunikační rozhraní
DALI	Digitálně adresovatelné komunikační rozhraní pro osvětlení
KNX	Inteligentní systém pro řízení a ovládání elektroinstalací
V-A	Volt-Ampérová
PWM	Pulzně šířková modulace
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
UV	Ultrafialové
IR	Infračervené
Obr.	Obrázek
Tab.	Tabulka
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
EIBA	Sdružení vedoucích firem v oblasti sběrnic pro řízení budov
ESHA	Evropská asociace domovních systémů
BCII	Mezinárodní klub BatiBUS
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci
TP	Kroucená dvoulinka
RF	Rádiové vlny
LAN	Lokální počítačová síť

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Stmívatelné předřadníky .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1.</b>	<b>Elektronický předřadník pro zářivková svítidla .....</b>	<b>2</b>
2.1.1.	Konstrukce elektronického předřadníku .....	2
2.1.2.	Princip funkce předřadného přístroje pro zářivky .....	3
2.1.3.	Princip funkce elektronického předřadníku .....	4
2.1.4.	Princip stmívání pomocí elektronického předřadníku .....	5
2.1.5.	Vliv teploty na životnost elektronického předřadníku: .....	6
2.1.6.	Výhody elektronických předřadníků: .....	6
2.1.7.	Druhy stmívatelných elektronických předřadníků .....	7
2.1.7.1.	Analogově stmívatelné předřadníky .....	7
2.1.7.2.	Digitálně stmívatelné předřadníky .....	7
<b>2.2.</b>	<b>Elektronické předřadníky pro LED diody .....</b>	<b>7</b>
2.2.1.	Napájení LED diod pomocí napěťového zdroje .....	8
2.2.2.	Napájení LED diod pomocí proudového zdroje .....	8
2.2.2.1.	Princip funkce proudového zdroje .....	9
2.2.3.	Stmívání LED diod .....	9
2.2.3.1.	Stmívání pomocí proudového zdroje .....	10
2.2.3.2.	Stmívání pomocí PWM .....	10
2.2.4.	LED driver .....	11
<b>3.</b>	<b>Snímače osvětlení .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1.</b>	<b>Fotoelektrický článek .....</b>	<b>12</b>
3.1.1.	Spektrální citlivost fotoelektrického článku .....	13
3.1.2.	Faktory ovlivňující citlivost fotoelektrických článků .....	13
<b>3.2.</b>	<b>Luxmetr .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.</b>	<b>Jasoměr .....</b>	<b>16</b>
<b>3.4.</b>	<b>Běžná čidla osvětlení .....</b>	<b>17</b>
3.4.1.	Přijímací charakteristiky .....	17
3.4.2.	Konektivita .....	17
<b>4.</b>	<b>Komunikační standardy pro řízení osvětlovacích soustav .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.</b>	<b>Analogové rozhraní 1–10 V .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.</b>	<b>Digitální rozhraní DALI .....</b>	<b>18</b>
4.2.1.	Vlastnosti DALI .....	19
4.2.2.	Způsob použití DALI v rámci správy budov .....	20
4.2.3.	DALI 2 .....	21
<b>4.3.</b>	<b>KNX .....</b>	<b>21</b>
4.3.1.	Základní vlastnosti KNX .....	22



4.3.1.1.	Použitá přenosová média.....	22
4.3.1.2.	Oblast využití systému KNX.....	22
4.3.1.3.	Napájení sběrnice KNX.....	23
4.3.1.4.	Počet připojitelných objektů a topologie.....	23
<b>5.</b>	<b>Návrh říditelné osvětlovací soustavy .....</b>	<b>24</b>
5.1.	Umístění a popis zkoumané místnosti .....	24
5.2.	Osvětlovací soustava instalovaná v místnosti LPOI302.....	25
5.2.1.	Použitá svítidla a jejich osazení.....	25
5.2.2.	Umístění svítidel v místnosti.....	26
5.3.	Soustava kontrolních bodů v úrovni místa zrakového úkonu .....	27
5.4.	Vlastnosti místnosti vstupující do výpočetního programu Wils .....	27
5.4.1.	Odraznosti povrchů.....	27
5.4.2.	Světelně technické vlastnosti použitého světelného zdroje.....	28
5.4.3.	Vlastností okenních otvorů.....	29
5.5.	Výpočet umělého osvětlení v místnosti LPOI302.....	29
5.6.	Výpočet denního osvětlení v místnosti LPOI302.....	30
<b>6.</b>	<b>Optimalizace typů a umístění snímačů .....</b>	<b>31</b>
6.1.	Senzory použité při zkoumání chování osvětlovací soustavy.....	31
6.1.1.	Vymodelování konkrétních snímacích úhlů pro senzory .....	32
6.1.2.	Umístění senzorů v rámci místnosti .....	32
6.2.	Optimalizace umístění senzoru osvětlení .....	34
6.2.1.	Mezní hodnoty při optimalizaci umístění senzoru .....	34
6.2.2.	Tabulky udržované osvětlenosti při regulaci .....	36
6.2.3.	Vyhodnocení vhodného umístění senzoru .....	36
6.3.	Optimalizace typu použitého senzoru .....	37
6.3.1.	Vyhodnocení optimálního přijímacího úhlu senzoru .....	37
6.4.	Energetická bilance regulace osvětlovací soustavy.....	38
6.4.1.	Vybraná zdrojová data .....	39
6.4.2.	Vyhodnocení příkonů soustavy během regulace .....	39
6.5.	Průběhy rovnoměrnosti osvětlení .....	40
6.5.1.	Vyhodnocení změn rovnoměrnosti osvětlení .....	41
6.6.	Minimální osvětlenosti v místnosti.....	41
6.6.1.	Vyhodnocení minimálního osvětlení.....	41
6.7.	Vliv změny odrazností povrchů na regulaci soustavy.....	42
6.7.1.	Parametry změn odrazností.....	42
6.7.2.	Vybraná zdrojová data .....	42
6.7.3.	Vyhodnocení vlivu změny odraznosti.....	43

<b>7. Závěr.....</b>	<b>44</b>
<b>8. Literatura.....</b>	<b>46</b>
<b>9. Seznam obrázků.....</b>	<b>48</b>
<b>10. Seznam tabulek .....</b>	<b>50</b>
<b>11. Seznam příloh .....</b>	<b>51</b>

# 1. Úvod

Osvětlovací soustava vnitřního osvětlení má za úkol zajistit zrakovou pohodu pro předem určený pracovní úkon a plnit tak normativní požadavky na vnitřní osvětlení. Vedle toho snaha investora ušetřit náklady za provoz osvětlovací soustavy vede k co nejúspornějším realizacím osvětlení. Jednou z hlavních úspor je využití denního světla v interiérech. Využití denního světla je výhodné ze zdravotního hlediska, kdy jej každý člověk potřebuje pro správnou funkci těla, a navíc je z ekonomického hlediska přínosné, neboť je dostupné zdarma.

Denní svit je proměnlivý, a proto je vhodné pro udržení zrakové pohody a optimalizaci provozních nákladů v objektech návrh regulace vnitřního osvětlení na konstantní hladinu osvětlenosti. Pro návrh vhodné regulační soustavy je nezbytné využití regulovatelných světelných zdrojů spolu s vhodným senzorem osvětlení. Moderní technologie nabízí využití řídicích systémů, které regulují autonomně osvětlovací soustavu, nebo lze zařadit řízení osvětlení do komplexní správy budov.

Předmětem této diplomové práce je návrh regulovatelné osvětlovací soustavy s přístupem denního světla do místnosti skrze okna. Vzorem pro návrh osvětlovací soustavy je reálná místnost využívána jako učebna. Pro získání nejlepších výsledků regulace na konstantní hladinu osvětlenosti je úkolem práce najít nejvhodnější kombinaci umístění senzoru osvětlení a jeho přijímací charakteristiky. Ve výpočtovém softwaru vytvořím virtuální model určené osvětlovací soustavy a pomocí výpočtových mechanismů budu simulovat chování regulace vnitřního osvětlení na konstantní hladinu osvětlenosti při nárůstu denního osvětlení vstupujícího do místnosti.

## 2. Stmívatelné předřadníky

Pro připojení světelného zdroje do elektrické sítě je zapotřebí vhodně upravit parametry elektrické energie na hodnoty požadované pro provoz daného zdroje. Pro tyto účely se využívají předřadné přístroje, které zajišťují jejich správnou funkci po dobu životnosti daného světelného zdroje. Volba správného předřadníku významně ovlivňuje světelné vlastnosti zdroje a podílí se taktéž na efektivitě provozování osvětlovací soustavy. Z počátku vývoje předřadných přístrojů se jednalo pouze o předřadníky pro výbojkové zdroje na principu tlumivky a startéru pro zajištění chodu lineárních zářivek. Nyní však sortiment předřadných přístrojů zprostředkovává funkci širší oblasti světelných zdrojů, jako například elektronické předřadníky pro zářivky a výbojkové zdroje, proudové zdroje pro LED diody, stmívající a řídicí prvky pro provozování svítidel jakožto řízeného celku. [6]

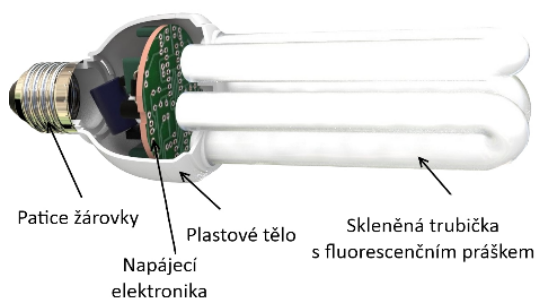
### 2.1. Elektronický předřadník pro zářivková svítidla

Elektronické předřadníky pro zářivková svítidla v dnešní době plně nahrazují starší typ předřadníku skládajícího se z tlumivky, startéru a kompenzačního kondenzátoru, které mají oproti elektronickému předřadníku řadu negativních vlastností vedoucích k postupnému nahrazování těchto magnetických předřadníků elektronickými. Hlavní přednosti regulovatelných elektronických předřadníků je snížení spotřeby elektrické energie osvětlovací soustavy až o 80 % [1] oproti provozu s konvenčním předřadným přístrojem, což primárně vede k finančním úsporám na dané soustavě. Další přednosti elektronického předřadníku jsou odstranění problikávání při startu výboje zářivky, prodloužení životnosti zářivkového zdroje až o 50 % [1] díky přehřevu elektrod zářivky. Nevzniká stroboskopický efekt v prostředí s rotačními částmi, jako u zářivek napájených frekvencí 50 Hz a odstraní se problém kompenzace induktivního charakteru při použití předřadníku s tlumivkou.

#### 2.1.1. Konstrukce elektronického předřadníku

Elektronický předřadník je vyráběn ve dvou typech. A to jako součást světelného zdroje (kompaktní zářivky) nebo samostatný předřadník.

V případě kompaktních zářivek je potřeba předřadnou elektroniku umístit tak, aby bylo možné nahradit klasickou žárovku ve standardní patici E27 anebo dalších typech patic běžně používaných v domácnostech. Proto je konstrukce uzpůsobena tak, že je předřadník umístěn přímo uvnitř závitů, případně v jeho těsné blízkosti v plastovém těle, ze kterého je následně vyvedená světelná trubice.



Obr. 1 Kompaktní zářivka s vestavěným předřadníkem [5]

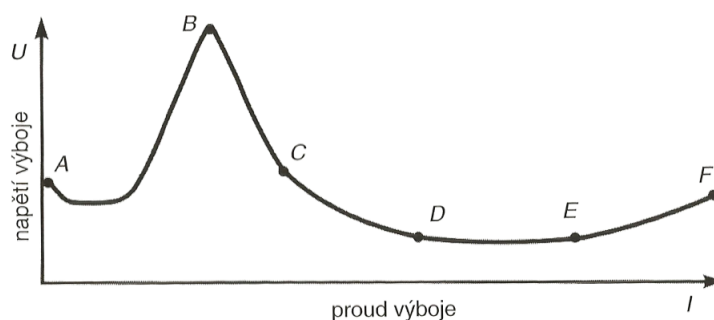
Samostatné předřadníky se vyrábí jako montážní díl do svítidel pro lineární zářivky a jednopaticové zářivky. U starších typů svítidel nechává výrobce možnost volby mezi tlumivkovým a elektronickým předřadníkem, avšak u moderních svítidel se používá výhradně elektronických předřadníků.



Obr. 2 Samostatný elektronický předřadník [3]

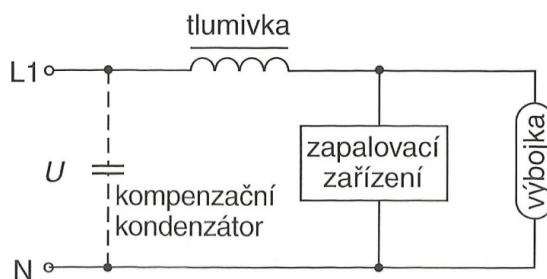
### 2.1.2. Princip funkce předřadného přístroje pro zářivky

Pro vysvětlení chování elektrického výboje uvnitř zářivky je vhodné toto popsat na volt-ampérové charakteristice, která znázorňuje závislost mezi proudem a napětím daného výboje.



Obr. 3 Volt – Ampérová charakteristika výboje zářivky [6]

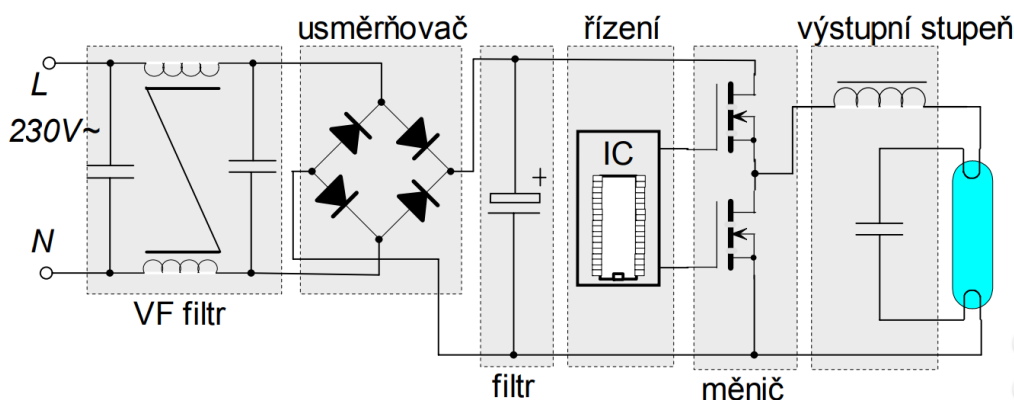
Při provozu zářivkového svítidla se pohybujeme mezi pracovními body A až E. Při startu výboje se nacházíme v pracovním bodě A, kdy potřebujeme vytvořit zápalné napětí pro započetí výboje, což se zajišťuje vhodným napěťovým impulzem o amplitudě přibližně 0,9 až 1,5 kV nebo nažhavením elektrod potřebným žhavicím proudem. Po zapálení výboje se dostáváme do oblasti C až E, kde potřebujeme omezit proud výboje na požadované hodnoty pro provoz světelného zdroje. Omezení proudu zajišťuje tlumivka, která se používá zvláště pro její malé činné ztráty při omezení proudu a rovněž kvůli lepší stabilitě výboje při vytvoření fázového posunu mezi napětím a proudem.



Obr. 4 Základní funkční schéma provozu výbojky [6]

### 2.1.3. Princip funkce elektronického předřadníku

Principiální funkce elektronického předřadníku je stejná jako v případě elektromagnetických, ale využívá se zde moderních součástek a principů pro zlepšení funkce daného předřadníku a úspory nejen materiálu, ale také spotřebované elektrické energie.



Obr. 5 Blokové schéma elektronického předřadníku [2]

Vstupní síťové napětí (v našich podmínkách 230 V, 50 Hz) je odděleno od vnitřního obvodu VF filtrem, který slouží k eliminaci harmonického zkreslení, omezení zpětných vlivů na napájecí soustavu a odstranění vysokofrekvenčního rádiového rušení (RFI filtr). Činnost filtrů vykazuje malý svodový proud  $I_s$  pohybující se v hodnotách 0,5 až 2 mA [6], který se uzavírá ochranným vodičem PE a je třeba jej uvažovat při návrhu osvětlovací soustavy z důvodu možné aktivace proudového chrániče. Standardně používané proudové chrániče mají vybavovací proud 30 mA, avšak při instalaci více předřadných přístrojů do stejného okruhu může dojít k jeho aktivaci.

Dalším článkem je nejčastěji můstkový usměrňovač, který usměrní vstupní střídavé napětí na pulsní stejnosměrné napětí.

To je dále přivedeno na kondenzátor, který vyhlazuje stejnosměrné napětí a plní funkci zásobníku energie pro měnič. Měnič je ve většině předřadných přístrojích realizován polomůstkovým zapojením dvou MOSFET nebo IGBT tranzistorů, které generují střídavé napětí o požadované frekvenci. Používaný rozsah frekvencí je v rozsahu 20 až 100 kHz. [6]

Řídicí obvod zastoupený mikroprocesorem má v předřadném přístroji hlavní roli při řízení výstupní frekvence střídače na základě požadovaných hodnot napětí a proudu v obvodu. Dále však plní funkci řízení korekce účinníku díky PFC filtru a řízení zapálení nebo předžhavení elektrod, který hlídá, zda byl výboj korektně zapálený v požadovaném čase. V opačném případě odpojí světelný zdroj, aby zabránil blikání zářivky při pokusech o opětovné zapálení oblouku.

Poslední částí předřadného přístroje je přizpůsobovací člen. Ten sestává z tlumivky omezující proud výbojkou a startéru případně zapalovače, který vytváří vysokonapěťový impuls nutný k zapálení výboje.

### 2.1.4. Princip stmívání pomocí elektronického předřadníku

Výkon světelného zdroje se v případě elektronického předřadníku řídí pomocí změny frekvence výstupního napětí, což vychází ze vztahu: [6]

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [1.1]$$

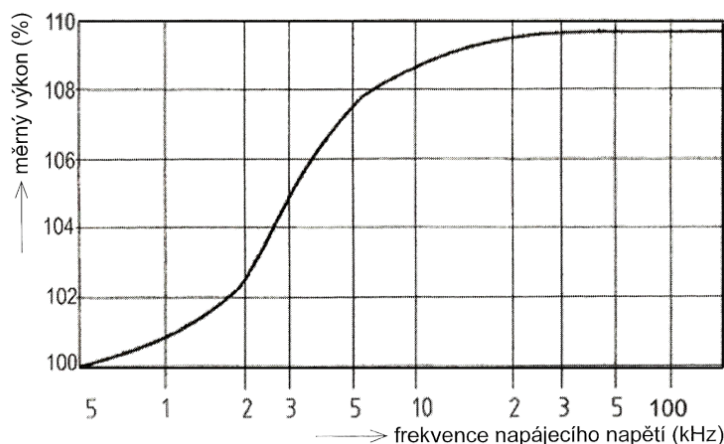
Pro zajištění maximálního světelného toku zdroje světla se generuje minimální pracovní frekvence napětí pomocí střídače. Proud zářivky je pak při konstantní hodnotě napětí střídače nepřímo úměrný velikosti reaktance použité tlumivky, která je, jak je patrné ze vztahu [1.1], přímo úměrná velikosti kmitočtu na výstupu střídače. [6]

$$I_z = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} \quad [1.2]$$

Zvýšíme-li tedy kmitočet, vzroste reaktance tlumivky a tím klesne proud protékající zářivkou a tím i její vyzařovaný světelný tok. Při řízení světelného toku pomocí frekvence však musíme brát v úvahu fakt, že pro udržení stabilního výboje je třeba udržovat teplotu elektrod. V případě nízké teploty výboj zanikne, zářivka zhasne, a proto musíme při klesajícím proudu zajistit ohřev elektrod pomocí žhavicího proudu.

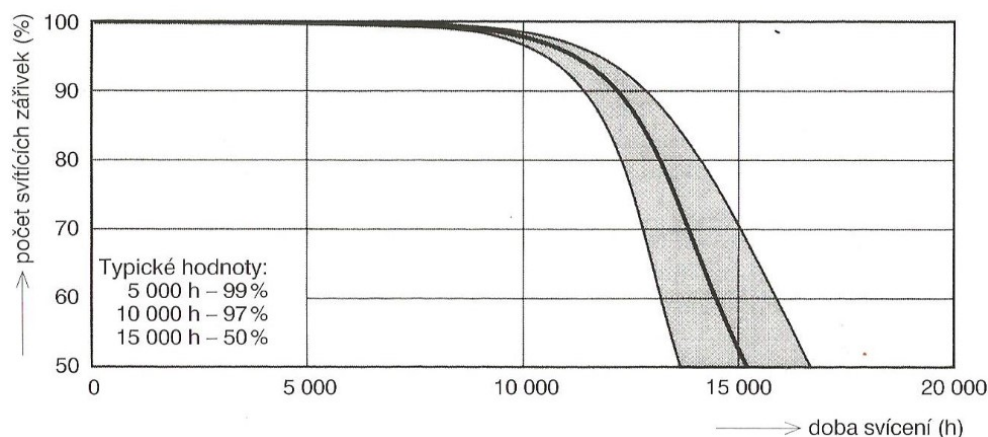
Z uvedených vztahů lze vidět, že lze díky řízení frekvence upravovat hodnotu indukční reaktance  $X_L$  a díky tomu ušetřit jak místo, tak i materiál při návrhu indukčnosti  $L$  použité v předřadném přístroji.

Řízením frekvence rovněž zvyšujeme efektivitu provozu daného světelného zdroje, což je patrné z obrázku **Obr.6**.



Obr. 6 Závislost měrného výkonu zářivky na napájecí frekvenci [6]

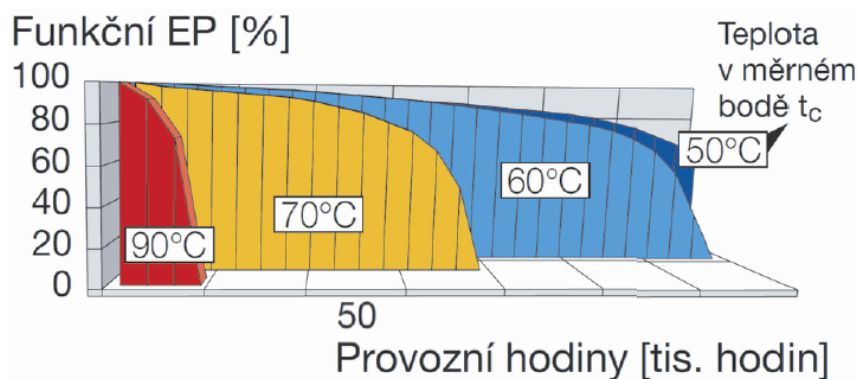
Důležitým parametrem při volbě zářivek je křivka střední doby životnosti, která znázorňuje počet funkčních zářivek ze zkoumaného celku po určitém čase provozu. Na základě vynesení této závislosti udává výrobce v katalogu životnost světelného zdroje, v grafu vyznačená tlustou černou čarou. Je to doba, za kterou bude při stejném provozování funkční polovina zářivek.



Obr. 7 Znáznornění střední doby životnosti zářivkových zdrojů [6]

### 2.1.5. Vliv teploty na životnost elektronického předřadníku:

Životnost elektrického předřadníku přímo závisí na teplotě, při které je daný předřadník provozován. Společnost OSRAM garantuje životnost předřadných přístrojů na 100 000 h provozu při teplotě 65 °C [1]. Tato teplota se snímá v tzv. kontrolním bodě, který je vytyčen na každém předřadném přístroji. Překročení této pracovní teploty o 10 °C má pak za následek zkrácení životnosti zhruba na polovinu, a naopak nižší provozní teplota o 10 °C prodlouží životnost na dvojnásobek. Proto je mnoho moderních předřadných přístrojů vybaveno hlídáním provozní teploty pro zabránění možných destruktivních stavů.



Obr. 8 Životnost předřadníku v závislosti na pracovní teplotě [7]

### 2.1.6. Výhody elektronických předřadníků:

- Úspora elektrické energie
- Odstranění stroboskopického jevu
- Není nutnost kompenzace
- Nižší potřeba materiálu – menší hmotnost
- Odstranění chvění a rušivého zvuku předřadníku
- Dosažení delší životnosti světelných zdrojů



## 2.1.7. Druhy stmívatelných elektronických předřadníků

### 2.1.7.1. Analogově stmívatelné předřadníky

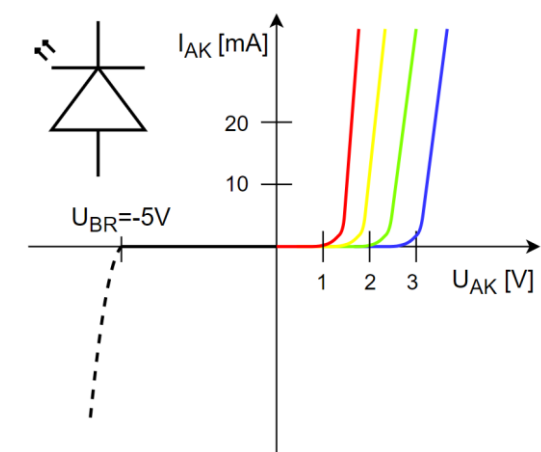
Tyto předřadníky jsou ovládány úrovní vstupního napětí v pracovním rozsahu 1–10 V přivedeného na vstup předřadníku dvou vodičovým signálním vedením. Díky úbytkům napětí na vedení nemusí být splněna podmínka nastavení stejné úrovně všech použitých předřadníků.

### 2.1.7.2. Digitálně stmívatelné předřadníky

Moderním způsobem řízení elektronických předřadníků je digitální komunikační rozhraní. Dřívější předřadníky komunikovaly s rozhraním DSI, které je nyní nahrazováno sběrnicí DALI. Výhodou digitálního řízení oproti analogovému přenosu je větší odolnost proti rušení a změně polarity řídicího napětí. Další výhodou je hlášení poruch svítidel a ukládání světelných scén do vestavěné paměti bez potřeby dalších modulů. Ovládací impulzy rovněž putují po dvou vodičové sběrnici. Oproti analogovému řízení je při použití digitálního přenosu zajištěna stejná úroveň nastavení všech stmívatelných předřadníků.

## 2.2. Elektronické předřadníky pro LED diody

Pro provoz LED diod potřebujeme zjednodušeně připojit na samotný čip diody stejnosměrné napětí takových parametrů, aby proud tekoucí čipem emitoval z P-N přechodu požadovaný světelný tok. Na obrázku **Obr. 9** je znázorněna obecná V-A charakteristika LED diod. Provozovaná oblast LED diody se nachází v 1. kvadrantu grafu což znázorňuje propustný směr diody. Diodu provozujeme v lineární části charakteristiky znázorněnou v grafu, která je z vrchní strany omezena maximálním proudem čipu.

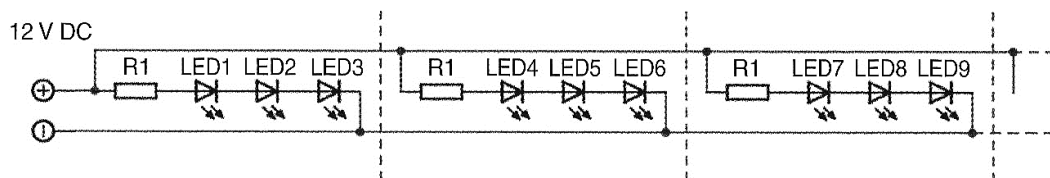


Obr. 9 V-A charakteristika LED diody [9]

Z tohoto lze tedy určit, že se jedná o napěťové nebo proudové zdroje typizovaných hodnot. Moderní LED předřadníky, nazývané LED drivers, rovněž obsahují ochrany proti přetížení použitých LED čipů, přepětí, zkratu či hlídače provozní teploty. Dále také obsahují vstupy pro regulaci světelného toku diod, a to jak pro analogové, tak digitální systémy řízení.

### 2.2.1. Napájení LED diod pomocí napětového zdroje

Při použití LED diod v jednoduchých zapojeních se používá napětový zdroj v kombinaci s předřadným rezistorem pro omezení proudu diodou. Tohoto se nejčastěji používá u svítících LED pásků, kde se používá sérioparalelní zapojení několika diod se společným rezistorem, kde je rezistor sériově spojený s několika LED diodami paralelně připojen ke zdroji napětí.



Obr. 10 Schéma zapojení LED pásky napájeného napětovým zdrojem [6]

Použití tohoto druhu napájení je nepraktické hned z několika důvodů. Předřadný odpor musí být přesně dimenzován na použitý typ diody a napájecí napětí. Při kolísání napájecího napětí se mění rovněž proud tekoucí LED diodami a tím i vyzařovaný světelný tok, což působí rušivě pro zrakový úkon. Použitý odpor rovněž způsobuje zhoršenou účinnost, neboť se energie v rezistoru maří v teplo.

### 2.2.2. Napájení LED diod pomocí proudového zdroje

Pro sofistikovanější aplikace LED diod se používá napájení pomocí proudového zdroje. Takovéto proudové zdroje mají přesně definovaný výstupní proud, který není závislý na napájecím napětí ani na úbytku napětí na samotné diodě. Každý takovýto zdroj proudu má definován výstupní proud pohybující se podle daného použití v rozsahu 30 mA až 1400 mA pro výkonové diody, nejčastěji pak velikosti proudu 350 mA a 700 mA. [7] Napájení soustavy LED diod proudovým zdrojem se provádí sériovým spojením a maximální počet takto spojených diod je omezen maximálním výstupním napětím daného zdroje.

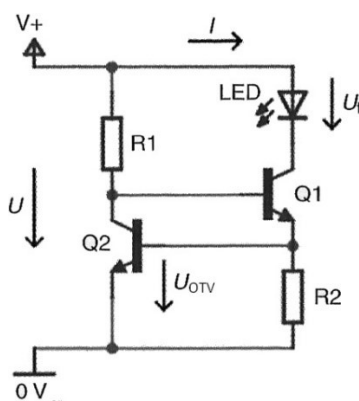


Obr. 11 Konstantní proudový zdroj OSRAM Optotronic FIT CS [1]

### 2.2.2.1. Princip funkce proudového zdroje

Na **Obr. 12** je znázorněno jednoduché schéma zapojení proudového zdroje pro LED diody. Princip tohoto zapojení je ten, že proud tekoucí sériovou kombinací LED diody, tranzistoru  $Q_1$  a rezistoru  $R_2$  vyvolá na rezistoru  $R_2$  úbytek napětí, které otevírá tranzistor  $Q_2$  přímo úměrně velikosti proudu. Při velkém proudu se tedy  $Q_2$  otevře více, a tím přivře tranzistor  $Q_1$ , díky čemuž proud diodou klesne na požadovanou hodnotu. Potřebné napětí k otevření tranzistoru je ve schématu označeno jako  $U_{OTV}$ . Ustálený proud tohoto zdroje je tedy dán podílem napětí potřebného k otevření tranzistoru  $Q_2$  a hodnotou rezistoru  $R_2$  a není tak závislý na napájecím napětí ani úbytku napětí diody. [6]

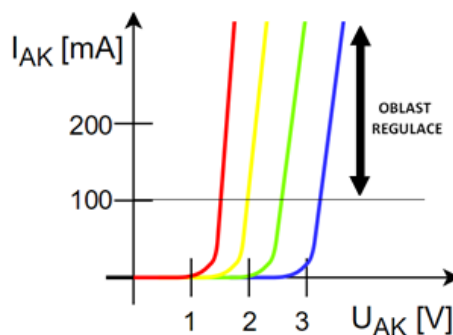
$$I = \frac{U_{OTV}}{R_2} \quad (A; V, \Omega) \quad [1.3]$$



Obr. 12 Základní zapojení zdroje proudu pro LED diody [6]

### 2.2.3. Stmívání LED diod

Princip stmívání LED diod vychází z V-A charakteristiky diody vyobrazené na obrázku **Obr. 12**, kde lze vidět, že pro strmost charakteristiky není vhodné použít regulaci změnou velikosti napětí. Pro rozsvícení potřebujeme určité napětí charakteristické pro danou diodu a po překročení této hodnoty se nepatrnou změnou napětí na čipu vyvolají velké změny proudu a tím i výsledného světelného toku.

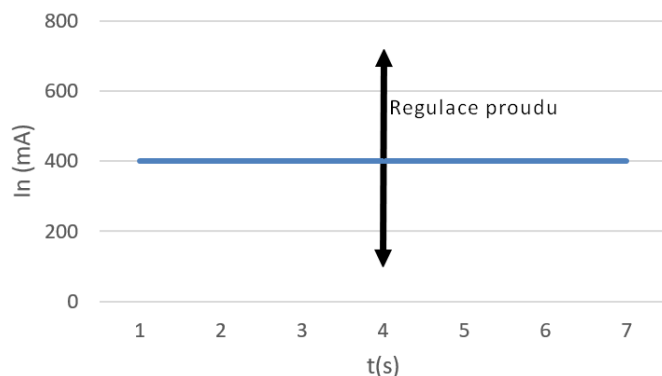


Obr. 13 V-A charakteristika diody v propustném směru [9]

Z tohoto důvodu se pro regulaci používá regulace proudu diodou. Stmívatelné LED diody mají pracovní rozsah světelného toku 0 % až 100 %.

### 2.2.3.1. Stmívání pomocí proudového zdroje

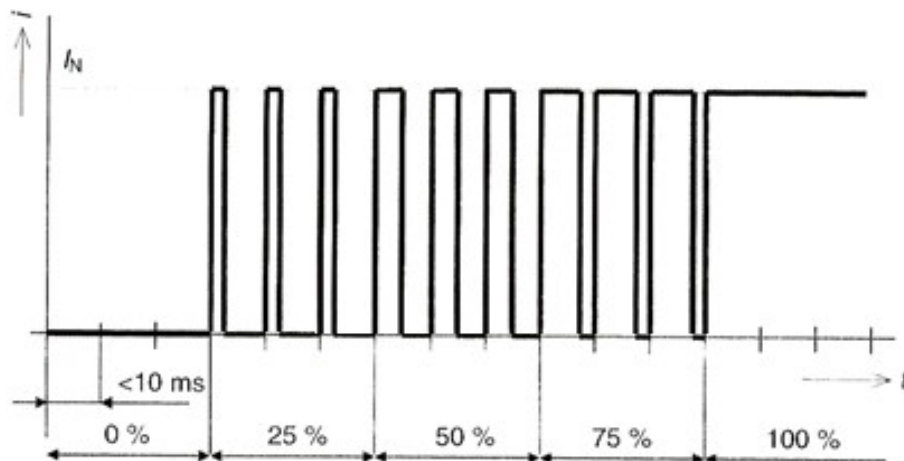
Při stmívání pomocí proudového zdroje se použije regulovatelný proudový zdroj. U takovýchto zdrojů můžeme regulovat amplitudu výstupního proudu a tím regulujeme světelný tok diody.



Obr. 14 Regulace proudu proudovým zdrojem

### 2.2.3.2. Stmívání pomocí PWM

Pulsně šířková modulace neboli PWM (Pulse width modulation) je regulace světelného toku pomocí spínání proudu v určitých časových intervalech. Jedná se o pulzní spínání proudu s obdélníkovým průběhem ve stavech plného proudu  $I_N$  a nulového proudu. Výsledný proud se reguluje pomocí změny střidy signálu, což je poměr mezi těmito dvěma stavy. To znamená, že pokud požadujeme poloviční výstupní proud tak zvolíme střidu 50 %. Tedy polovinu periody bude proud nulový a polovinu bude roven  $I_N$ . Analogicky poté pro ostatní hodnoty požadovaného výstupního proudu.



Obr. 15 Znáornění principu změny střidy při PWM [6]

Při volbě nízkých kmitočtů může nastat stav, kdy lidské oko začne vnímat blikání LED diody, a proto se volí frekvence pulsů větší než 100 Hz. Dále je nutno uvažovat nad frekvencí blikání diody z důvodů vzniku stroboskopického jevu v místnostech s točivými stroji, kde by mohlo vzniknout nebezpečí vzniku úrazu.

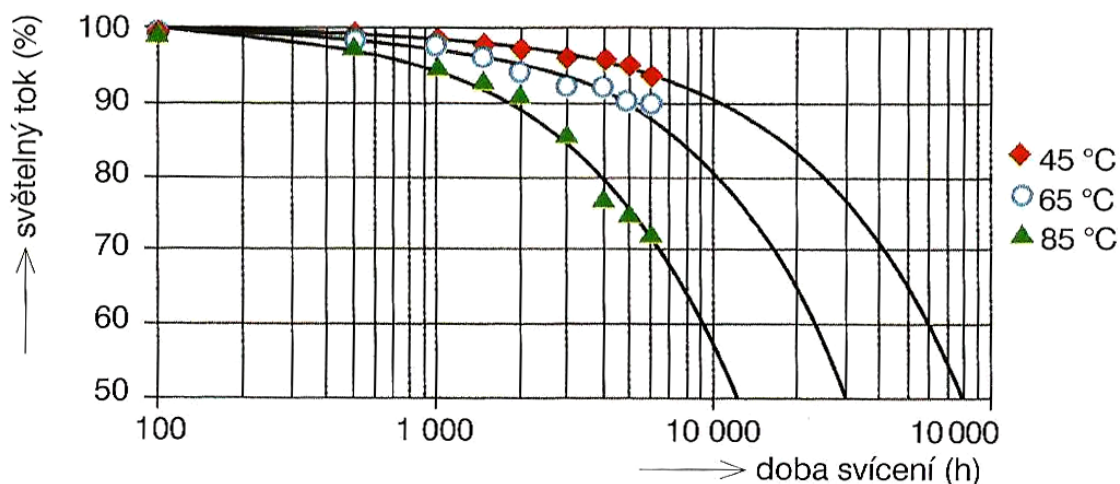
Při použití stmívání pomocí PWM musíme rovněž uvažovat fakt, že světelný tok diody neroste v celém rozsahu lineárně se zvyšujícím se proudem. Při proudových pulzech s vysokou amplitudou klesá efektivita přeměny elektrické energie na světlo a toto výrazně ovlivňuje výslednou energetickou efektivitu světelného zdroje.

Pro eliminaci tohoto problému se zařazují na výstup PWM zdroje filtrační prvky v podobě elektrolytického kondenzátoru, který výsledný průběh vyhladí a tím se zdroj na výstupu chová jako zdroj konstantního proudu a dosáhne většího světelného toku při menším výstupním proudu.

## 2.2.4. LED driver

Pojmem LED driver se rozumí nejen zdroj napětí či proudu pro LED diody, ale je pod tímto názvem zahrnuto vše potřebné k provozu světelného zdroje. Moderní LED drivery obsahují také ochranu proti zkratu, přetížení a automatickou regulaci výkonu v závislosti na teplotě, která pomáhá udržet nejen konstantní světelný tok, ale napomáhá také k prodloužení životnosti světelného zdroje, neboť životnost LED čipů je závislá na provozní teplotě podle *Obr. 15*.

V případě destruktivní úrovně teploty dokáží zátěž plně odpojit a ochránit tak napájený LED čip před jeho zničením.



Obr. 16 Životnost LED v závislosti na provozní teplotě [6]

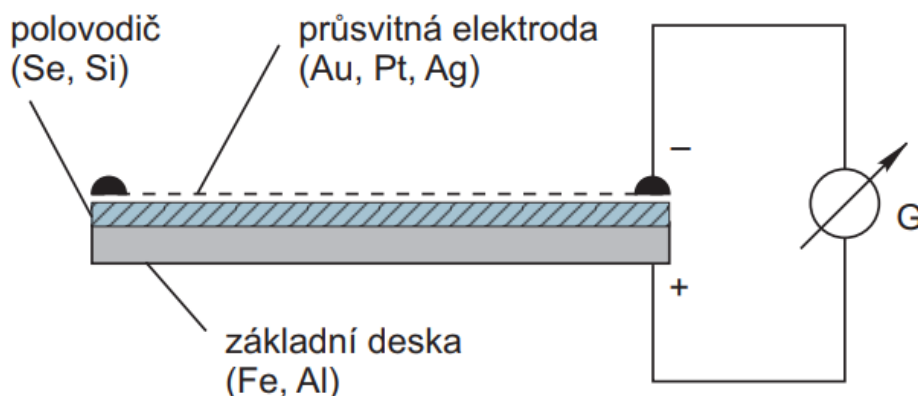
Další vlastností driverů je regulovatelnost pomocí principů popsanych v kapitole 2.2.3. **Stmívání LED diod.** K ovládání regulace světelného toku používají řídicí vstupy pro stmívače, světelná čidla či pro analogové komunikační standardy nebo DALI sběrnice. Střední doba života LED driverů se udává 50 000 h. [1]

### 3. Snímače osvětlení

Pro správnou regulaci osvětlovací soustavy potřebujeme údaje o skutečném stavu úrovně osvětlenosti v dané místnosti. Dřívější způsob regulace byl na základě subjektivního vjemu osoby v místnosti (pozorovatele), kdy tento pozorovatel měl možnost pomocí regulačního prvku, nejčastěji v podobě potenciometru zabudovaného ve vypínači, řídit úroveň světelného toku svítidel na úroveň, kterou považoval za dostatečnou. V moderním světě se tyto děje řídí automaticky za použití fyzikální fotometrie, kdy jsou oči pozorovatele nahrazeny světelným senzorem, jeho úsudek je dán přesně nastaveným rozsahem požadované osvětlenosti a samotné ovládání světelného toku zdroje světla řídí mikroprocesor uvnitř dané osvětlovací soustavy. Díky těmto moderním přístupům můžeme regulovat osvětlovací soustavy mnohem efektivněji a při použití kvalitních snímacích členů také přesněji dodržovat požadovanou úroveň osvětlenosti, neboť nejsme závislí na kvalitě zraku pozorovatele. Snímání hladiny osvětlenosti rovněž pomáhá snižovat příkon osvětlovacích soustav díky tomu, že ne vždy je potřeba plného výkonu světelných zdrojů.

#### 3.1. Fotoelektrický článek

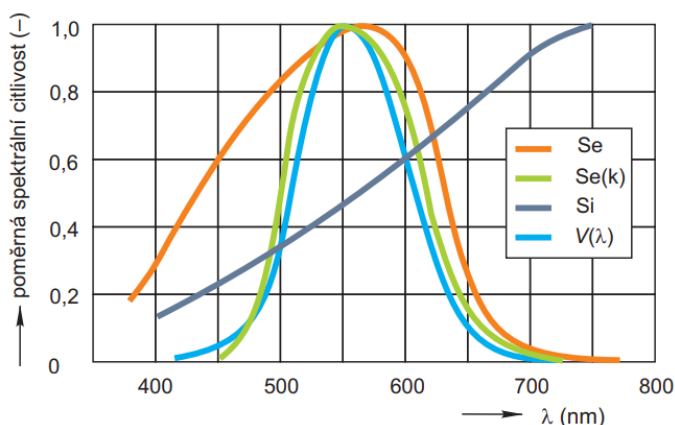
V objektivní fotometrii je lidské oko nahrazeno fyzikálním čidlem, které nám zajišťuje výsledky měření nezkreslené kvalitou zraku či subjektivním vnímáním pozorovatele. K tomuto účelu se pro fotometrická měření využívá nejčastěji hradlových fotoelektrických článků, které pracují na principu fotoelektrického jevu. Konstrukce článku je zobrazena na **Obr. 18** a skládá se z kovové podložky, nejčastěji vyráběné ze železa či hliníku. Na této podložce je nanesená tenká vrstva polovodičového materiálu, kterým je v dnešní době převážně křemík (dříve selen). Polovodičová vrstva je dále pokryta průsvitným filmem zlata, platiny nebo stříbra a po obvodu článku je poté sběrná elektroda pro odvod elektrického proudu. Principiálně funguje článek tak, že při dopadu světelných paprsků na tenkou vrstvu polovodiče vznikne mezi vrstvou polovodiče a kovovou podložkou rozdíl potenciálů a pokud uzavřeme obvod začne tímto obvodem protékat fotoelektrický proud.



Obr. 17 Hradlový fotoelektrický článek – principiální ukázka konstrukčního uspořádání [6]

### 3.1.1. Spektrální citlivost fotoelektrického článku

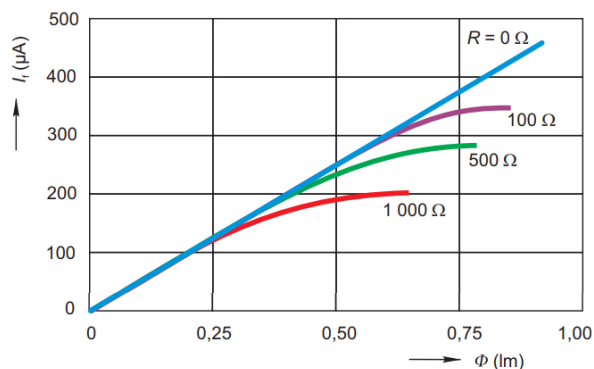
Jednou z nejdůležitějších vlastností fotoelektrického článku je shoda spektrální citlivosti článku s křivkou  $V(\lambda)$  spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele při denním vidění zobrazenou na **Obr. 19**. Tento aspekt je zvláště důležitý při měření světelných zdrojů s kombinovaným či čárovým spektrem, jakým jsou například výbojkové světelné zdroje. Pro korekci spektrální citlivosti starších selenových čidel se používaly speciální filtry typu VISKOR, kdežto pro korekci křemíkových čidel, jejichž spektrální citlivost je zcela odlišná od křivky  $V(\lambda)$  se používá složitějších postupů v podobě aplikace monochromatických filtrů, které korigují celou oblast viditelného záření. Při použití vhodných filtrů pro úpravu světelného spektra dopadajícího na čidlo dosahujeme průběhů spektrální citlivosti shodujících se s křivkou  $V(\lambda)$ . Případný pokles citlivosti se kompenzuje vhodným zesilovačem.



Obr. 18 Průběhy poměrné spektrální citlivosti fotoelektrických článků ve srovnání s  $V(\lambda)$  člověka [6]

### 3.1.2. Faktory ovlivňující citlivost fotoelektrických článků

Odpor vnějšího obvodu fotoelektrického článku způsobuje nelinearitu závislosti fotoelektrického proudu na světelném toku dopadajícím na článek. Tato závislost je tedy teoreticky lineární při nulovém odporu vnějšího obvodu. Pro zmenšení chyby měření způsobené odporem vnějšího obvodu se používá měření proudu nakrátko, které vliv odporu kompenzuje. Na **Obr. 20** je znázorněna závislost proudu na světelném toku pro starší typ článku se selenovou polovodičovou vrstvou, kde se nelinearita projeví již při odporu vnějšího obvodu 100 Ω. Pro novější typy s použitím křemíkových vrstev je to odpor 500 Ω.

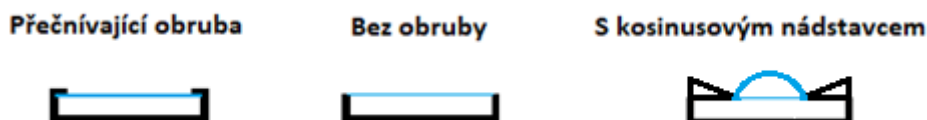


Obr. 19 Závislost fotoelektrického proudu na světelném toku při různých odporech vnějšího obvodu [6]

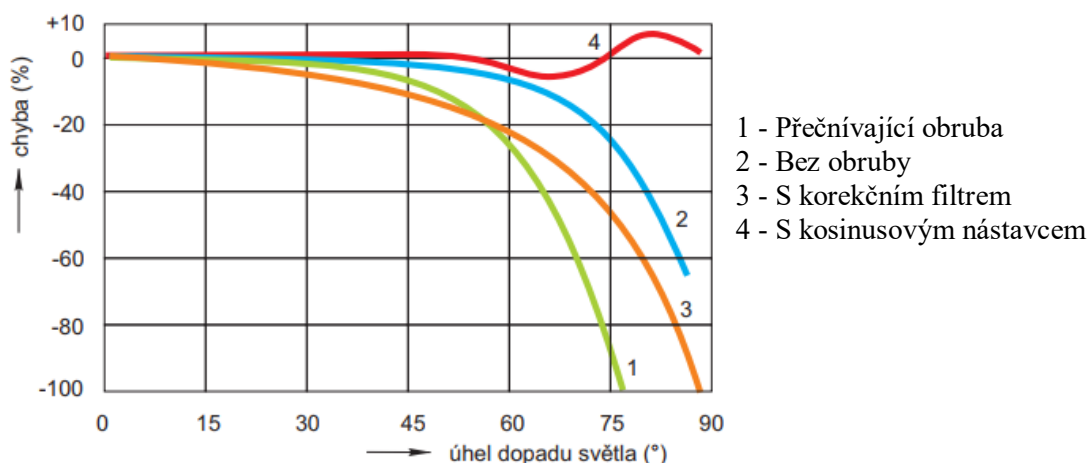
**Teplota okolí** v rozmezí teplot 25–50 °C ovlivňuje fotoelektrický proud u křemíkových čidel o  $\pm 1 \%$  [6], což je zanedbatelná hodnota pro provozní měření, ale při přesných měřeních je třeba s touto odchylkou počítat.

**Frekvence kolísání světelného toku** se uvažuje například u výbojkových světelných zdrojů napájených napětím o síťovém kmitočtu. Moderní světelné zdroje napájené elektronickými předřadníky však pracují při vysokých frekvencích a tento vliv se již uvažovat nemusí.

**Úhel dopadu světla** zkresluje měřené hodnoty, neboť se fotoelektrické články kalibrují na světlo dopadající kolmo k podložce. Světlo dopadající pod úhlem se tedy řídí podle Kosinova zákona. V případě úhlů větších než 30° bylo vypořádováno větších odchylek měření vzniklých částečným zrcadlovým odrazem čidla, špatnou propustností vrstvy či stíněním čipu obrubou. [6] Odchytky z různých důvodů jsou vyobrazeny na obrázku **Obr.22**. Konstrukční náskres základních typů používaných čidel je na **Obr. 21**.



Obr. 20 Základní konstrukční typy používaných čidel



Obr. 21 Chyby měření způsobené různými příčinami [6]

### 3.2. Luxmetr

Luxmetr je přístroj pro objektivní měření osvětlenosti. Luxmetr se skládá z fotometrické hlavy s korigovaným křemíkovým fotoelektrickým článkem přizpůsobeným pro spektrální citlivost  $V(\lambda)$  vybaveným nejčastěji kosinusovým nástavcem a vyhodnocovacího členu se zobrazovacím prvkem pro vykreslení naměřené hodnoty. Luxmetry se používají především ke měření rovinné osvětlenosti, ale můžeme se setkat také s typy pro měření kulové, polokulové, válcové či polo válcové osvětlenosti.





Obr. 22 Luxmetr VOLTcraft [11]

Standardně používané Luxmetry se řadí do čtyř tříd přesnosti označených 1, 2, 3 a 4 nebo podle mezinárodního doporučení CIE písmeny L, A, B, C, kterým je přidělena odpovídající největší dovolená souhrnná chyba 2, 5, 10 a 20 %. Při vyhodnocování přesnosti luxmetru sledujeme jedenáct druhů chyb.

Posuzované chyby jsou:  $f_1$  – relativní chyba stupnice  
 $f_2$  – spektrální chyba  
 $f_3$  – směrová chyba (úhel dopadu světla)  
 $f_4$  – chyba nestability  
 $f_5$  – chyba vlivu teploty  
 $f_6$  – odchylka spektrální citlivosti čidla (odchylka od  $V(\lambda)$ )  
 $f_7$  – chyby citlivosti na UV záření  
 $f_8$  – chyby citlivosti na IR záření  
 $f_9$  – chyba linearity  
 $f_{10}$  – chyba měření modulovaného záření  
 $f_{11}$  – chyba změny rozsahu přístroje

Tab. 1 Shrnutí požadavků na Luxmetry a Jasoměry pro jednotlivé typy použití [6]

Přesnost	Dovolená chyba celková		Odhad rozšířené nejistoty [%]	Platnost kalibrace [rok]
	Luxmetr [%]	Jasoměr [%]		
Přesná měření	$\pm 5$	$\pm 7,5$	$U \leq 8$	2
Provozní měření	$\pm 10$		$8 < U \leq 14$	3
Orientační měření	$\pm 15$		$14 < U \leq 20$	5

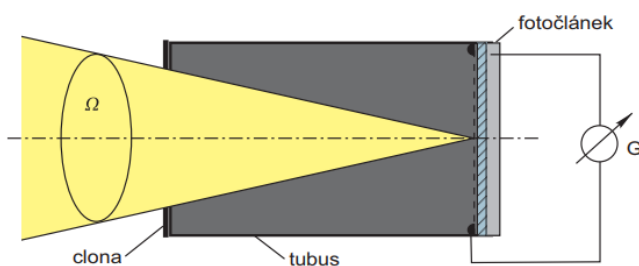
Pro konstrukci luxmetru se doporučuje, aby přijímací plocha fotočlánku byla do průměru 30 mm. Dříve než provedeme měření je vhodné nechat snímací členy odkryté alespoň 5 minut v prostředí, které chceme měřit, abychom zabránili chybám způsobených postupnou adaptací fotočlánku na dané prostředí. Luxmetr, jakožto každý měřicí přístroj, je nutno pravidelně revidovat a kalibrovat v intervalech daných normou: **ČSN 36 0011-3 Měření osvětlení vnitřních prostorů – část 3: Měření umělého osvětlení**, 2006 vypsanych v **Tab.1**. Při měření Luxmetrem je nutno dbát toho, aby si osoba provádějící měření nestínila a neovlivnila tím měřenou úlohu. Za tímto účelem jsou kvalitní přístroje vybaveny měřicím prvkem na dostatečně dlouhém stíněném kabelu. V případě, že daný přístroj má zabudovaný měřicí prvek přímo v těle, bývá opatřen dálkovým ovládáním snímání a fixace naměřené hodnoty. V případě, že dálkové ovládání nemá, je možné jej použít pouze pro orientační měření. [6]

### 3.3. Jasoměr

Jasoměr je přístroj pro objektivní zjištění jasů měřené plochy. V principu se jedná o klasický fotometrický článek, který je opatřen stínícím tubusem. Tento tubus má za úkol přesně vymezit prostorový úhel  $\Omega$  z něhož dopadají paprsky na měřící člen, který pak změří normálovou osvětlenost  $E_N$ , ze které se poté pomocí základního vztahu (1.4) pro jas určí výsledný střední jas plochy  $L$ . Rovnice pro jas: [6]

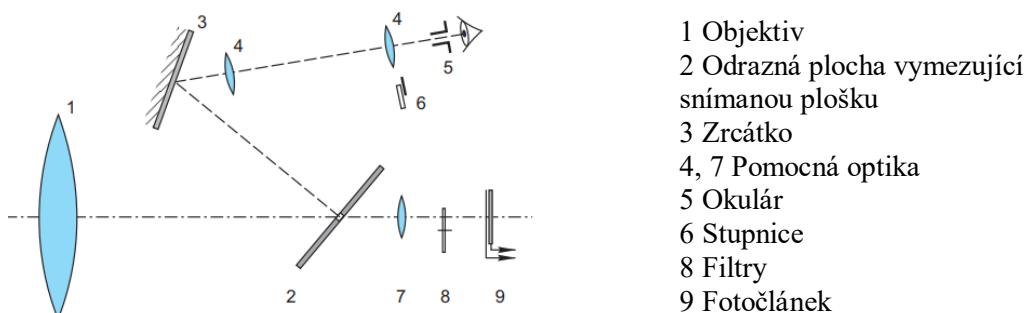
$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (cd \cdot m^{-2}; lx, sr) \quad [1.3]$$

Nákres principiálního uspořádání takového jasoměru je vyobrazen na obrázku **Obr.24**, kde vidíme fotočlánek opatřen tubusem. Tubus je uvnitř vyroben z černého materiálu pro zamezení rušivých odrazů a na konci tohoto tubusu je clona, ve které je otvor přesně vymezující prostorový úhel, který jasoměr snímá.



Obr. 23 Nákres principiální funkce jasoměru [6]

Zvláštní zřetel je třeba dbát na to, jakou plochu jasoměrem snímáme. Jasoměr vyhodnocuje střední hodnotu jasů plochy, kterou vymezuje optika daného přístroje v závislosti na vzdálenosti od měřené plochy. Proto je třeba, aby snímaná plocha zahrnovala pouze povrch, pro který určujeme daný jas. Tohoto je u běžně používaných jasoměrů docíleno kroužkem v zorném poli okuláru, kterým měřící osoba sleduje měřený povrch. Proto se nemůže stát, že vznikne chyba měření jasů měřené plochy, způsobená částečným rušením jinou plochou. Nákres principu takového běžně používaného jasoměru, který vymezuje měřenou plochu, je znázorněn na **Obr. 25**.



Obr. 24 Principiální uspořádání běžného jasoměru [6]

Souhrn požadavků, které musí jasoměry splňovat, je obsažen v normě **ČSN 36 0011 – 3 Měření osvětlení vnitřních prostorů – Část 3**. Vyráběné jasoměry mají obvykle zorná pole o úhlech 6', 15', 30', 1°, 2°. [6] Tabulka s přípustnými chybami pro jednotlivé třídy přesnosti a jejich intervaly revizí jsou obsaženy v tabulce **Tab. 1**.

### 3.4. Běžná čidla osvětlení

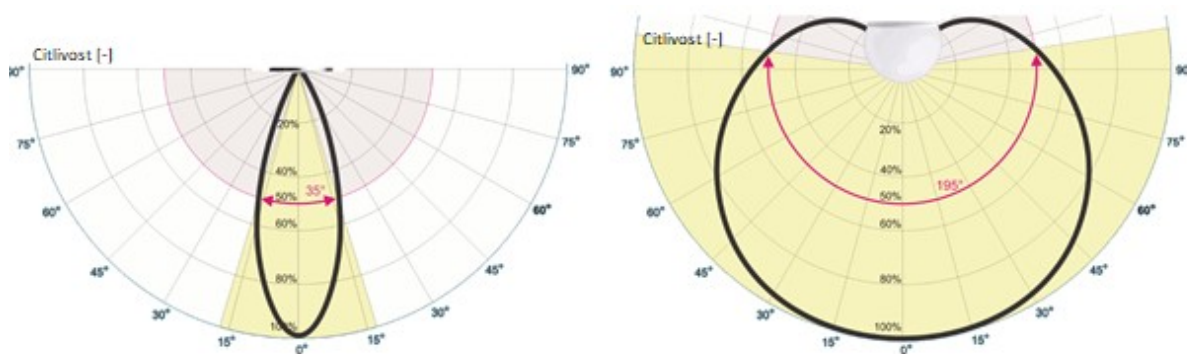
Běžně používané typy čidel vnitřního osvětlení používají pro snímání osvětlení principů zmíněných v kapitole 3.1, tedy fotoelektrického článku. Při konstrukci čidel osvětlení se snažíme přiblížit vlastnostem luxmetru, přičemž se omezuje na dodržení spektrální citlivosti čidla a směrové chyby.



Obr. 25 Čidlo osvětlení TRIDONIC basicDIM ILD 16DPI 69f [12]

#### 3.4.1. Přijímací charakteristiky

Hlavním parametrem světelného čidla je jeho přijímací charakteristika. Ta určuje, jakým způsobem bude senzor prostorově vyhodnocovat osvětlenost v daném objektu. Při popisu luxmetru jsme si definovali jako nejvhodnější snímací prvek fotometrickou hlavu s Kosinusovým nadstavcem, která má ideálně kruhovou přijímací charakteristiku. V případě běžně dostupných čidel je však úhel snímání osvětlení omezen. Běžné dostupná světelná čidla mají tento úhel mezi 140° až 30°, přičemž právě 30° je mezi prodávanými čidly nejběžnější. Tento úhel je pak určen z bodu přijímací charakteristiky, kdy čidlo přijímá 50 % světelného toku z místnosti, jako je to vyobrazeno na Obr. 27, kde je vyobrazena přijímací charakteristika pro 35° vlevo na obrázku a 195° vpravo.



Obr. 26 Přijímací charakteristiky pro různé úhly snímání [13]

#### 3.4.2. Konektivita

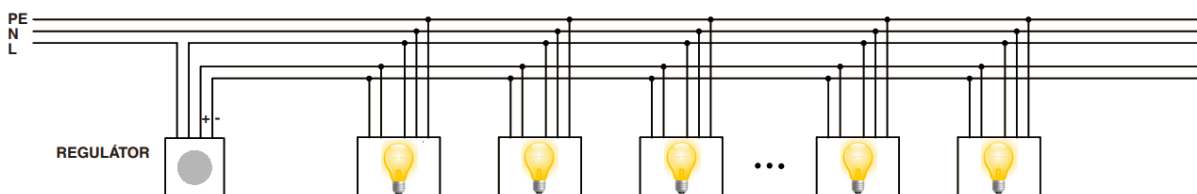
Pro efektivní využití čidla ke snížení nákladů za osvětlení je nutno toto čidlo připojit ke svítidlu a pomocí naměřených hodnot jej vhodně regulovat pro dosažení požadované hodnoty konstantní osvětlenosti. Speciální typy čidel jsou navrženy pro přímé připojení k předřadníkům, přičemž nastavení požadované osvětlenosti se provádí na samotném čidle. V případě složitějších aplikací se využívá propojení čidla s řídicí jednotkou pomocí komunikačních standardů. Hlavní komunikační standardy pro propojení čidel s řídicí jednotkou jsou 1...10 V a DALI. Různí výrobci však využívají své komunikace, které však postrádají výhodu standardizovaných vlastností a dobré konektivity mezi různými výrobci.

## 4. Komunikační standardy pro řízení osvětlovacích soustav

Komunikační standardy v osvětlovacích soustavách mají za úkol přenášet potřebné informace mezi světelným zdrojem a regulačními členy, které mají vliv na jeho funkci. V případě řízení osvětlení na konstantní hladinu osvětlenosti se bavíme o komunikaci elektronického předřadníku ovládajícího světelný zdroj a čidla osvětlení, které hlídá skutečnou hladinu osvětlenosti v místnosti. Hlavní dvě skupiny komunikací jsou analogové a digitální systémy. Mezi hlavní technologii analogové komunikace patří systém 1–10 V. Digitální rozhraní využívá nejčastěji protokol DALI nebo komplexní systém pro řízení celých budov KNX.

### 4.1. Analogové rozhraní 1–10 V

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší způsob regulace osvětlení. Tento standard využívá rozsah analogového napětí od 1 V až do 10 V stejnosměrných, přivedeného na řídicí vstup elektronického předřadníku. Princip řízení je takový, že máme regulační člen, kterým je například pro jednoduchost otočný regulátor osvětlení, který má výstup stejnosměrného napětí 1 až 10 V, přičemž 1 V odpovídá 10 % výstupního proudu a 10 V odpovídá 100 % výstupu. Propojení se realizuje dvěma signálními vodiči, kdy jeden zastupuje kladnou a druhý zápornou polaritu napětí, přičemž tyto vodiče nesmí být zaměněny. Při rozsáhlejších aplikacích regulace se díky nutnosti použití dvou vodičů ke každé regulované soustavě vyskytují velké svazky signálních vodičů a rovněž zde na dlouhých kabelových trasách vzniká úbytek napětí, který může vyvolat rozdílné nastavení jednotlivých předřadníků v dané instalaci. Ukázka zapojení osvětlovací soustavy s použitím standardu 1-10 V je vyobrazena na **Obr. 28**. Analogové systémy řízení jsou postupně nahrazovány digitálním rozhraním DSI nebo novějším DALI.



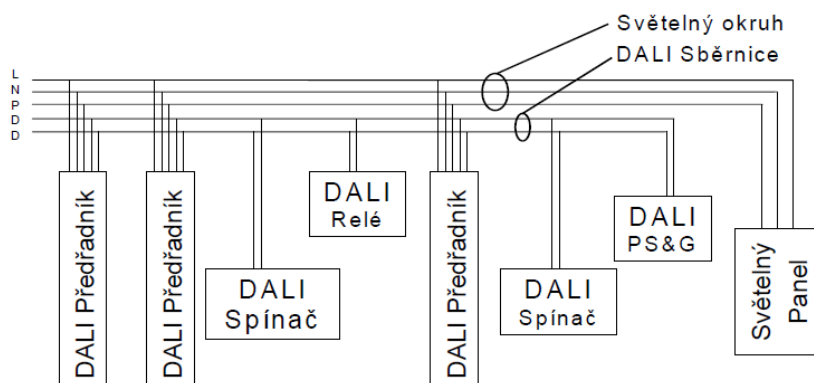
Obr. 27 Zapojení osvětlovací soustavy s použitím regulátoru 1-10 V [3]

### 4.2. Digitální rozhraní DALI

Komunikační protokol DALI, zkratka z anglického Digital Addressable Lighting Interface neboli digitální adresovatelné světelné rozhraní, vznikl pod záštitou mezinárodní elektrotechnické komise IEC jako náhrada za analogové řešení řízení osvětlovacích soustav, u kterých nebylo možné separátní řízení jednotlivých svítidel v objektu či variabilně ovládat či měnit světelné skupiny podle aktuálních potřeb. DALI rozhraní je sběrníkový systém, který tyto věci umožňuje a lze jej provozovat buď samostatně jako izolovaný osvětlovací systém, nebo jej lze zakomponovat do jako subsystém do technologií správy budov. Jedná se o mezinárodní standard popsany v normě **ČSN EN 62386 – Digitální adresovatelné rozhraní pro osvětlení**. Díky tomu je zaručena vzájemná kompatibilita elektronických předřadníků či regulačních prvků od různých výrobců pomocí DALI protokolu. Tato norma také přesně určuje systém přenosu, adresaci a definuje jednotlivé příkazy a reakce prvků v soustavě.

### 4.2.1. Vlastnosti DALI

Jedná se o dvou vodičovou sběrnici, u které při zapojení nezáleží na polaritě vodičů. Sběrnice je odolná vůči rušení, a proto její datové vodiče lze implementovat do napájecího kabelu pro 230 V. Limitem pro datové vodiče je pak jejich délka, která je různá pro jednotlivé průřezy vodičů. Při použití průřezu 0,5 mm<sup>2</sup> je maximální délka vedení 100 m, při 0,75 mm<sup>2</sup> pak 100–150 m a při použití 1,5 mm<sup>2</sup> je to maximálně 300 m. Maximální pokles napětí je 2 V. Rozsah logických úrovní je definován pro přijímací stranu. Logická 0 je v rozsahu -6,5 V – 6,5 V. Datové kabely lze libovolně větvit, avšak je doporučeno netvořit uzavřený kruh. Ukončení sběrnice je možné kdekoliv bez použití jakýchkoliv komponent. Datová propustnost je stanovena na pevné komunikační rychlosti 1200 bps. [14]



Obr. 28 Příklad zapojení osvětlovací soustavy pomocí DALI [14]

Sběrnice DALI musí mít vždy svůj zdroj, který je buďto samostatný nebo je součástí hlavního řídicího členu (master) a musí být zapojen jen jeden z důvodu možných vyrovnávacích proudů mezi zdroji. Maximální proud zdroje je 250 mA. [14] Výrobce zdroje by měl udávat také garantovanou hodnotu výstupního proudu zdroje, pro kterou by měl být dimenzován celý systém. Celkový proud zjistíme součtem proudů všech prvků v soustavě (předřadníků, čidel, spínačů...), které by měl udávat každý výrobce v datovém listě. Sběrnice je galvanicky oddělena od napájecího zdroje. V případě přerušení vodiče či zkratu na sběrnici klesne napětí sběrnice k nule a DALI předřadníky přepnou do nouzového režimu, který je továrně nastaven na 100 % světelného toku, ale lze tento režim libovolně přizpůsobit.

Komunikační protokol DALI je navržen tak, že komunikuje mezi jednotlivými prvky osvětlovací soustavy pomocí předdefinovaných příkazů a dotazů. Takovýto příkaz je složen z 19 bitů, kde první bit je spouštěcí, dále 8 adresovacích bitů, 8 příkazových či datových bitů a na konec dva stop bity. Adresovací skupina osmi bitů pak pro adresaci konkrétního prvku používá pouze 6 bitů, což umožňuje naadresovat 64 jedinečných prvků v soustavě, zbylé bity umožňují vysílání pro předdefinované skupiny. Příkazy definované protokolem DALI jsou například: vypnout, stmívat na úroveň, nastavit výkon na úroveň, nastavit maximum a tak dále. Pro dotazy jsou definovány funkce jako úroveň poruch, čas stmívání, aktuální úroveň a jiné.

Ovládané prvky jsou rozděleny podle druhu daného prvku do 256 typů, kde se využívá pevně definovaných 6 typů a zbytek je rezerva pro nové typy přístrojů. [14] Mezi tyto předdefinované typy

patří například digitální předřadníky pro zářivky, zařízení pro nouzové osvětlení, vysokotlaké výbojkové zdroje, analogové prvky 1 – 10 V a jiné.

Velkou výhodou DALI systémů je také samo diagnostika, kdy jsou předřadníky schopny hlásit řídicí jednotce svůj provozní stav a díky tomu vyhodnotit, že některý prvek v soustavě vypověděl funkci. Dále jsou řídicí jednotky vybaveny vnitřní pamětí, do které lze uložit 16 světelných scén mezi kterými si poté může uživatel volit bez nutnosti opakovaného nastavování každé z nich. Rovněž lze nastavit také přesný průběh stmívání svítidel podle požadavků daných prostor. Nastavení jednotlivých funkcí se provádí pomocí počítače připojeného přes komunikační modul, který zprostředkovává převod na rozhraní RS 232.

Systém DALI má tyto limity:

- Maximálně připojení 64 individuálně pracujících jednotek
- Maximálně lze vytvořit 16 světelných skupin
- Maximálně lze nastavit 16 světelných scén

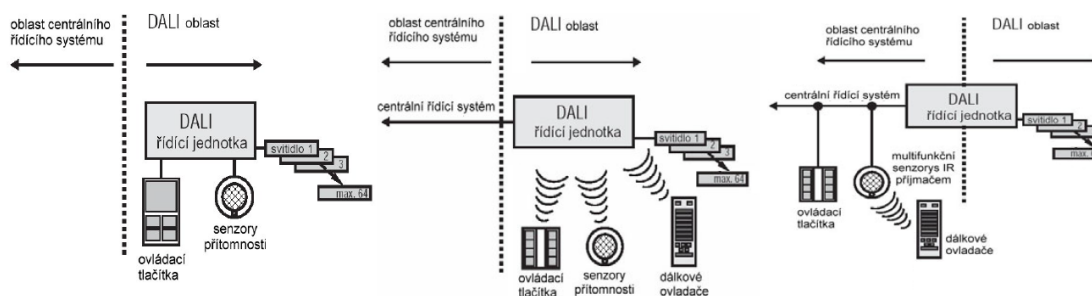
#### 4.2.2. Způsob použití DALI v rámci správy budov

Při správě větších budov můžeme využít DALI jakožto samostatný systém nebo jej integrovat do rozsáhlejších ovládacích systému jakožto subsystém.

Nejsnadnějším řešením realizace systému DALI je aplikovat jej jakožto samostatný systém. Takovýto systém se skládá tedy pouze ze samotné řídicí jednotky, napájení, datové sběrnice a předřadníků. Připojení ovládacích prvků (přepínače, čidla pohybu či osvětlení...) se provádí buďto připojením k řídicí jednotce nebo na datovou sběrnici.

Složitější aplikací je použití DALI jako samostatného podsystému v rozsáhlejšímu systému správy budov. Veškeré zapojení je stejné jako v předchozím případě, kdy všechna čidla či předřadníky komunikují s řídicí jednotkou DALI. Oproti předchozímu případu je zde ale propojení řídicí jednotky DALI se systémem správy budov, se kterým komunikuje. Takto může systém DALI přijímat informace od správy budov nebo také informovat o provozních stavech, avšak může pracovat samostatně. V případě softwarových možností lze programovat DALI přímo ze systému správy budov.

Poslední možností je použití DALI jako závislého subsystému, kdy systém správy budov přebírá všechny funkce systému DALI a pro komunikaci mezi sebou je použit překladač. Při poruše systému správy budov pak není systém DALI schopen pracovat samostatně v plném rozsahu.

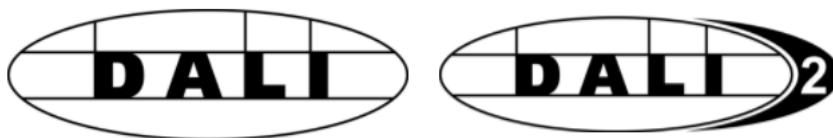


Obr. 29 Ukázka jednotlivých způsobů aplikace DALI systému [14]



### 4.2.3. DALI 2

Protokol DALI byl od svého vytvoření několikrát vylepšen a díky tomu vznikla druhá verze normy **IEC 62386**, která určuje nový standard, který je znám pod názvem DALI-2. Tento standard pomáhá vylepšovat nedostatky staré verze a díky tomu vylepšit kompatibilitu s různými výrobci při zachování zpětné kompatibility s původním protokolem DALI. [5]



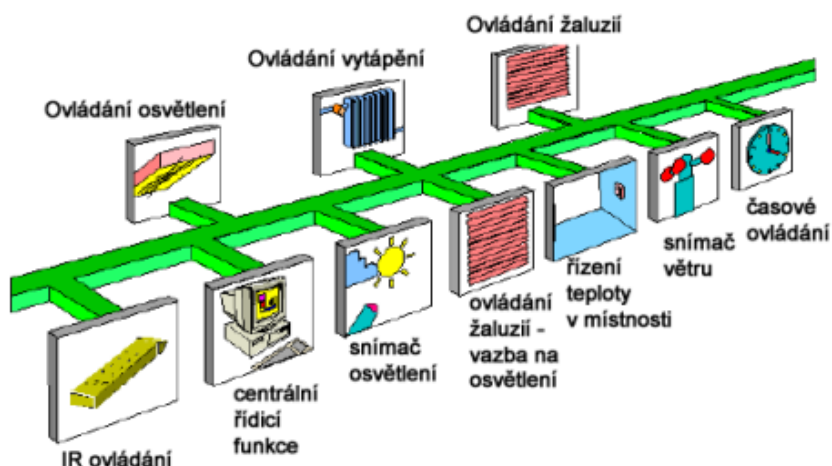
Obr. 30 Označení původního standardu DALI a nové verze DALI-2 [15]

Oproti původní verzi zaručuje nový standard certifikované řídicí zařízení, atesty jednotlivých prvků a databázi produktů označených standardem DALI-2.

Dále také nový standard slibuje jednodušší instalaci nových systémů, nižší nároky na kabeláž, levnější komponenty, zvýšený komfort ovládání, flexibilitu použití a snadnější údržbu. [15]

### 4.3. KNX

Jedná se o celosvětově standardizovaný systém pro automatizaci domů a budov založen roku 1999 třemi členy: EIBA (Asociace pro evropskou instalační sběrnici), EHSA (Evropská asociace systémů pro domy), BCI (Mezinárodní klub BatiBUS). Využití systému KNX umožňuje sjednotit ovládání regulace osvětlení, vytápění, recirkulace vzduchu, klimatizace, rozvody silové energie, měření a monitorování stavu prostředí budovy, systémy zabezpečení, audio a video a mnoho dalších. Protokol KNX je schválen Evropským výborem pro elektrotechnickou normalizaci CENELEC jako evropský standard **EN 50090**, avšak vlastní také celosvětové standardizace ISO/IEC.



Obr. 31 Princip sběrnice KNX [17]

### 4.3.1. Základní vlastnosti KNX

V soustavách konstruovaných pomocí technologie KNX má každá technologie vlastní řídicí jednotku a informace se šíří přímo mezi zařízeními tzv. point-to-point přes sběrníkové vedení. Jedná se tedy o decentralizovaný systém řízení.

#### 4.3.1.1. Použitá přenosová média

Přenosové médium mezi jednotlivými zařízeními může být kroucená dvoulinka KNX TP, silový rozvod KNX PL, radiové vlny KNX RF nebo datová síť LAN v budově KNX IP. [16] Nejčastější je však využívaná varianta KNX TP, jež je jednoduchá, levná a je možné ji použít ve všech typech budov. V případě rekonstrukcí či špatné dostupnosti realizace datového vedení však lze použít například KNX RF a tím se vyhnout jakýmkoliv zásahům do konstrukce budovy při pokládce vedení. Při instalaci lze použít jen jedné technologie, v případě kombinace je nutno využít mediálních spojek. V případě projekce nových elektronických instalací je vhodné důkladně promyslet sběrníkové vedení a jednotlivé datové vodiče ke všem zamýšleným zařízením. Pokládka vedení se realizuje souběžně se silovým vedením. Přídavné náklady na takovou instalaci jsou zanedbatelné, přičemž potenciál pozdějšího využití je obrovský.

#### 4.3.1.2. Oblast využití systému KNX

Oblast použití systému KNX v rámci budov je velmi široká a lze říct, že zasahuje do všech oblastí technologického zařízení budov. Jak je patrné z obrázku *Obr.33*, jedná se o ovládání osvětlení či stínění, vytápění a klimatizaci, zabezpečovací systémy, monitorovací systémy, vzdálené připojení k domu, audio/video přístroje či zařízení spadající do kategorie bílé techniky.



Obr. 32 Oblast využití sběrníkového systému KNX v budovách [18]



#### 4.3.1.3. Napájení sběrnice KNX

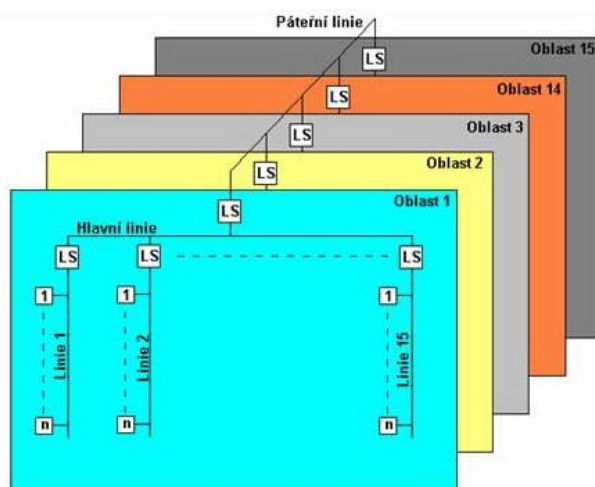
Napájení sběrnice KNX TP se provádí bezpečnostním oddělovacím transformátorem pro napětí SELV. Minimální napětí pro funkci je 21 V. Zdroje napětí se vyrábějí v typizovaných hodnotách výstupního proudu (160 mA, 320 mA, 640 mA, 1280 mA). [16] Počet použitelných sběrniceových přístrojů, které lze připojit do jedné linie je tedy omezen výkonem zdroje. Obecně se počítá 200 mW na jeden přístroj, což nám dovolu je připojit 64 přístrojů ke zdroji 640 mA. [16] Hodnota 200 mW je ovšem pouze orientační pro představu o navrhovaném systému. Skutečný odběr se musí vyčíst z datového listu výrobce.

Nejdelší možné vedení pro centralizované zdroje napětí je 1000 m. Maximální dovolená vzdálenost mezi dvěma účastníky je 700 m a mezi účastníkem a zdrojem napětí je to 350 m. Výrobce také uvádí minimální vzdálenost mezi dvěma zdroji napětí jako 200 m. [16]

#### 4.3.1.4. Počet připojitelných objektů a topologie

Počet připojených přístrojů na jednu linii je limitován adresací na 256. [16] V případě možnosti využít teoreticky až 15 linií a 15 oblastí jsme schopni naadresovat až 57 600 prvků a díky tomu pokrýt i ty největší systémy inteligentních budov.

Systémy KNX využívají stromovou topologii pro každou oblast i linii. Orientační schéma konstrukce sítě KNX systému je zobrazeno na **Obr. 34**.



Obr. 33 Stromová topologie systémů KNX [19]

## 5. Návrh říditelné osvětlovací soustavy

Pro návrh soustavy jsem použil jako předlohu existující místnost. Tohoto jsem využil pro simulaci konkrétní situace vyskytující se v praxi, kterou by imaginární zkušební místnost nemusela věrně poskytovat. Při 3D modelování jsem využíval prostředí BuildingDesign od společnosti Astra MS software s. r. o. s nadstavbou Wils (verze 7.0.238) pro výpočet umělého osvětlení a Wdls (verze 5.0.124) pro výpočet denního osvětlení.

### 5.1. Umístění a popis zkoumané místnosti

Zkoumaná místnost se nachází na půdě Vysoké Školy Báňské – Technické Univerzity Ostrava, konkrétně fakulty Stavební sídlící na adrese: Ludvíka Poděště 1875/17 Ostrava, Poruba. Místnost nese interní označení LPOI302, je ve třetím podlaží nově přistavěné části budovy Pavilonu velkých poslucháren. Umístění budovy v rámci městské zástavby lze vidět na **Obr. 35**, který je orientován pohledem ze severu.



Obr. 34 Letadlový snímek umístění budovy v rámci Fakulty stavební VŠB – TU Ostrava [20]

Samotná místnost je využívána dle normy **ČSN EN 12464-1** jako učebna, či konzultační místnost s předepsanou minimální osvětleností 300 lx. Rozměry místnosti jsou 8850 x 7200 mm s výškou stropu 3100 mm. Stěny jsou natřeny čistě bílou barvou, podlaha pokryta červeným linoleem a strop složený z bílých čtvercových podhledových bloků 600 x 600 mm. V místnosti se nachází 4 řady školních lavic po 6 stolech o rozměrech 800 x 750 x 600 mm (Š x V x H), katedra 1500 x 750 x 750 mm a na zadní straně místnosti je vestavěná skříň 6595 x 2260 x 450 mm zakrývající nosník.

Jednu stranu místnosti tvoří od výšky parapetu 950 mm až po strop dvě okna s rozměry levého okna 2425 x 2150 mm a rozměry pravého okna 5600 x 2150 mm směřovanými na severní stranu budovy. Tyto okna jsou rozdělena nosníkem o rozměrech 400 x 400 mm. Na obrázku Obr. 36 vidíte srovnání reálné fotografie pořízené v dané místnosti s 3D modelem vytvořeného v prostředí BuildingDesign. Prostředí bylo zjednodušeno na prvky charakterizující vlastnosti odrazných ploch v místnosti.

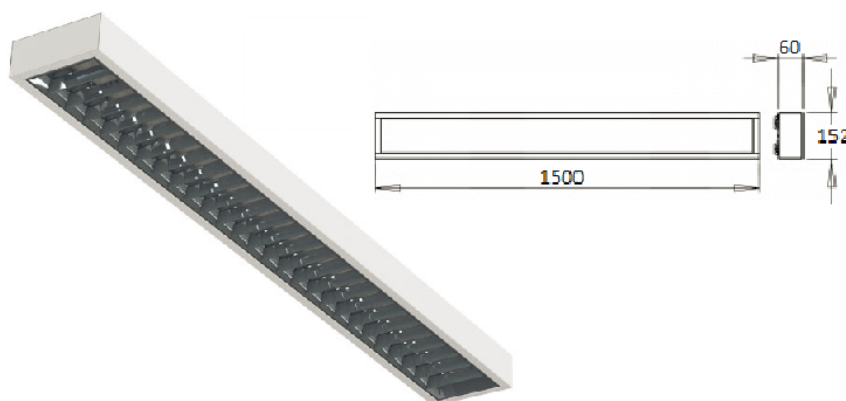


*Obr. 35 Ukázka reálné místnosti a 3D modelu*

## **5.2. Osvětlovací soustava instalovaná v místnosti LPOI302**

### **5.2.1. Použitá svítidla a jejich osazení**

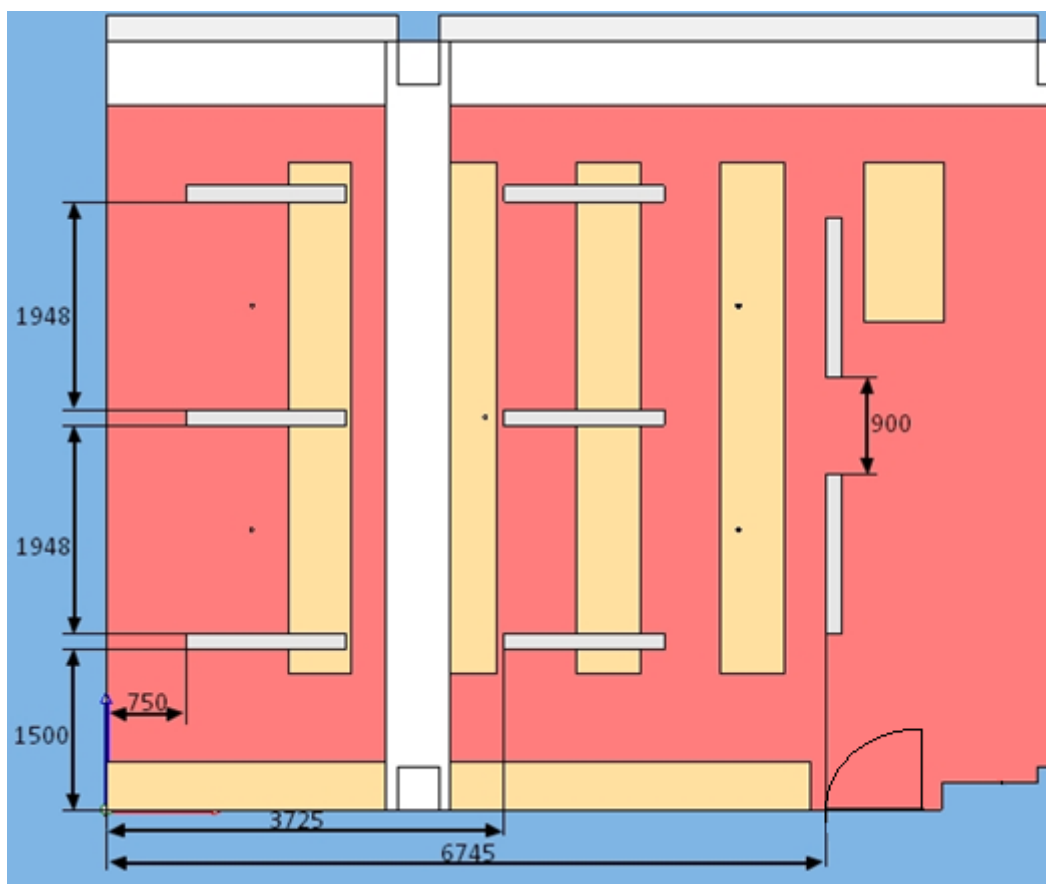
V místnosti je instalovaná osvětlovací soustava realizována přisazenými zářivkovými svítidly výrobce HORMEN, typ VOIIDA T5. Jedná se o svítidlo obdélníkového tvaru o rozměrech 1500 x 152 x 60 mm bílé barvy. Difuzor je realizován jako stříbrná mřížka z anodizovaného hliníkového plechu. Svítidlo disponuje krytím IP20.



*Obr. 36 Svítidla instalována v místnosti LPOI302 [21]*

Jako světelný zdroj jsou ve svítidle použity dvě zářivkové trubice typu T5 typového označení Osram HO49 W/840. Jedná se o lineární zářivky, pro které výrobce udává životnost zářivek až 24 000 h. Index podání barev  $R_a = 80\text{--}89$ . Jmenovitý příkon svítidla 98 W. Náhradní teplotu chromatičnosti světelného zdroje 4 000 K. [22]

Místnost je osazena osmi svítidly popsanými v kapitole **5.2.1** přisazenými ke stropu ve výšce 3100 mm. V místnosti se dále nachází dvě svítidla pro nasvětlení tabule přednášejícího, ty však nebyly pro případ výpočtu osvětlení uvažovány z důvodu toho, že nejsou určeny pro trvalé zajišťování osvětlenosti v místnosti. Rozmístění svítidel je znázorněno na **Obr. 38**. Jedná se o pravidelnou síť šesti svítidel rozdělenou do dvou řad po třech svítidlech, ke kterým je přisazena z pravé strany dvojice svítidel kolmých k ose zbylých šesti.



26

### 5.3. Soustava kontrolních bodů v úrovni místa zrakového úkonu

Srovnávací rovina je v dané místnosti definovaná jako rovina, na které se provádí zrakový úkol neboli místo zrakového úkonu. Tu v dané místnosti charakterizuje výška stolů. Jedná se tedy o výšku 750 mm. Pro návrh hustoty kontrolních bodů jsem vycházel z normy **ČSN EN 12464-1 Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory**. Navrhovaná síť má tedy přibližně čtvercovou strukturu, kde maximální rozteč mezi kontrolními body je definovaná vztahem: [8]

$$p = 0,2 \cdot 5^{\log d} \quad [1.4]$$

Kde:  $p$  – maximální vzdálenost mezi kontrolními body v síti v metrech kdy  $p \leq 10$   
 $d$  – rozměr delší strany zkoumané plochy v metrech

Důležitým pravidel je také, že rozteč kontrolních bodů by se neměla shodovat s roztečí svítidel, neboť by mohly být výsledky zkresleny vlivem přímého osvětlení řady kontrolních bodů pod svítidlem. Dále je při výpočtu bráno na zřetel okolí zkoumané plochy o šířce 0,5 m, ve kterém se kontrolní body neuvažují, a proto se tento okraj z výpočtu vynechává. Jedinou výjimkou je případ, kdy se pracovní úkol provádí právě v místě tohoto okraje.

Vlastní výpočet:

- Rozměry místnosti: 8,850 x 7,200 m
- Po odečtení 0,5 m okraje  $\rightarrow$  7,85 x 6,2 m

$$p = 0,2 \cdot 5^{\log d} = 0,2 \cdot 5^{\log 7,85} = 0,844 \text{ m} \quad [1.5]$$

Maximální vzdálenost mezi kontrolními body v síti je tedy v případě zvolené místnosti LPOI302 vypočten jako  $p = 0,844$  m. Pro výpočtový program jsem tedy zvolil z důvodů vhodného rozložení bodů síť o rozteči bodů 785 x 740 mm s okrají 500 mm z levé strany místnosti a 950 mm ze zadní strany. Zvýšený okraj byl volen z důvodu umístění nábytku u stěny, který posouvá pomyslný využitelný okraj místnosti. V místnosti je tak umístěno 88 kontrolních bodů v síti 11 x 8 bodů ve výšce místa zrakového úkonu 750 mm.

### 5.4. Vlastnosti místnosti vstupující do výpočetního programu Wils

#### 5.4.1. Odraznosti povrchů

V modelované místnosti jsem definoval objektům konstantní odraznost. Při volbě jsem se držel doporučených hodnot uvedených v normě **ČSN EN 12464-1 Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory** a hodnot orientačních odrazností povrchů uvedených v publikaci [6].

Norma doporučuje tyto odraznosti:	Stěny	0,5 až 0,8
	Strop	0,7 až 0,9
	Podlaha	0,2 až 0,4
	Nábytek	0,2 až 0,7

V mém návrhu jsem zohlednil barvy povrchů a jejich materiál a v **Tab. 2** jsou uvedeny veškeré volené hodnoty přiřazené objektům v 3D modelu místnosti:

Tab. 2 Volené odraznosti povrchů v místnosti LPOI302

Typ objektu	Zvolená odraznost	Materiál a barva povrchu
Stěny	0,75	Nátěr bílý
Strop	0,75	Stropní bloky bílé
Podlaha	0,3	Linoleum červené
Školní lavice	0,48	Dřevo hnědé
Katedra	0,48	Dřevo hnědé
Skříň	0,48	Dřevo hnědé
Dveře	0,21	Laminované dřevo červené
Tabule	0,9	Keramika bílá
Nosník	0,75	Nátěr bílý

#### 5.4.2. Světelné technické vlastnosti použitého světelného zdroje

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2.1 o použitých svítidlech je místnost osvětlována osmi svítidly VOIIDA T5 výrobce Hormen. Každé svítidlo v místnosti je osazeno dvěma zářivkovými trubicemi firmy Osram typu HO 49W/840. Katalogový list je obsažen v elektronické příloze.



Obr. 38 Ukázka popisu zářivky Osram HO 49W/840 [22]

Katalogové informace o použité zářivce: [22]

- |                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| - Měrný výkon:                    | 88 lm/W |
| - Jmenovitý výkon                 | 49 W    |
| - Index podání barev Ra           | ≥80     |
| - Jmenovitý světelný tok          | 4310 lm |
| - Náhradní teplota chromatičnosti | 4000 K  |
| - Stmívatelná                     | ANO     |

Vyzařovací charakteristiku svítidla jsem získal z internetového katalogu výrobce HORMEN v podobě .ldt souboru, který jsem importoval do výpočetního prostředí Wils. Údaje obsažené v .ldt souboru jsem doplnil o použitou zářivkovou trubici Osram HO 49W/840. Udržovací činitel světelného zdroje pro výpočet byl zvolen dle technických parametrů svítidla 0,76 pro simulaci nejméně příznivé situace pro regulaci. Důležitou modifikací pro možnost regulace osvětlení bylo zanedbání klasického nestmívatelného elektronického předřadníku, který tuto regulaci neumožňoval. Stávající světelná soustava tudíž fungovala pouze v režimu zapnuto/vypnuto. Tento režim by mi při výpočtu nedovoloval zkoumat chování soustavy při řízení na konstantní hladinu osvětlenosti.



### 5.4.3. Vlastností okenních otvorů

Místnosti zprostředkovávají denní světlo dvě okna na přední (severní) straně místnosti. Jediným rozdělením oken je nosník umístěný zhruba ve druhé třetině místnosti.

Rozměry oken:

- levé okno 2725 x 2150 mm
- pravé okno 5600 x 2150 mm

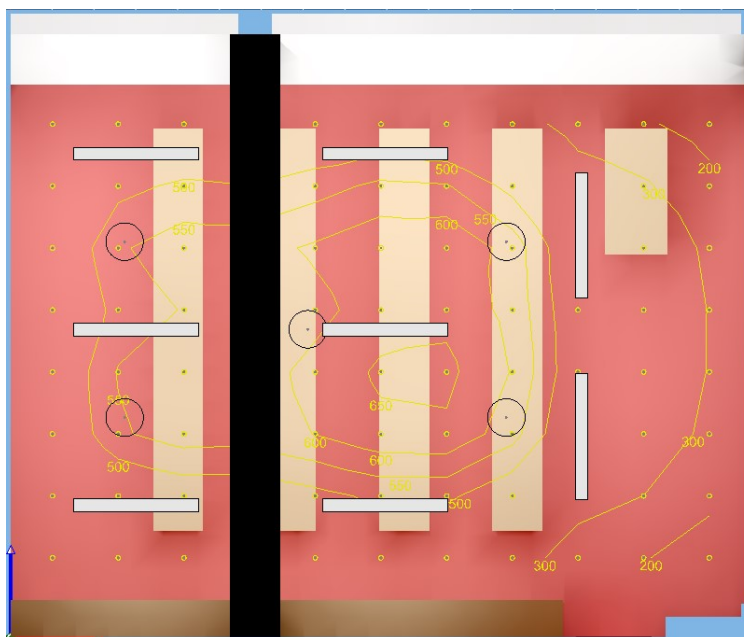
Výška dolní hranice oken je dána parapetem umístěným ve výšce 950 mm. Použitá okna byla volena jako dvou vrstvá z čirého skla s koeficientem prostupu světla jednou vrstvou skla 0,92. Koeficient konstrukce otvoru 0,75.

## 5.5. Výpočet umělého osvětlení v místnosti LPOI302

Pro výpočet umělého osvětlení byl použit výpočetní program Wils. Výpočet umělého osvětlení byl vypočítán bez přispění denního osvětlení, tudíž s hodnotou osvětlenosti na venkovní ploše 0 lx. Využití dané učebny je v souladu s normou *ČSN EN 12464-1* jako prostor s referenčním číslem **5.36.1 Učebny, konzultační místnosti** s předepsanou udržovanou osvětleností 300 lx. Rozložení umělého osvětlení vypočtené programem Wils je znázorněno na **Obr. 40**. Výstupní protokol výpočtu umělého osvětlení je uložen v elektronické příloze pod názvem *Vystupni\_protokol\_umeleho\_osvetleni.pdf*.

Vypočtené hodnoty:

- Minimální osvětlenost: 154,2 lx
- Udržovaná osvětlenost 452,5 lx
- Maximální osvětlenost 663 lx
- Rovnoměrnost 0,23
- Udržovací činitel 0,76



Obr. 39 Rozložení umělého osvětlení v místnosti LPOI302

## 5.6. Výpočet denního osvětlení v místnosti LPOI302

Výpočet denní osvětlenosti srovnávací roviny v místnosti LPOI302 byl proveden ve výpočtovém prostředí BuildingDesign s použitím nadstavby Wdls pro výpočet denního osvětlení. Výpočet probíhal s odstavenou vnitřní osvětlovací soustavou, při venkovním osvětlenosti 20 000 lx na nezastíněné ploše při rovnoměrně zatažené obloze podle CIE. Průběh denního osvětlení při venkovní osvětlenosti 20 000 lx v místnosti je vyobrazen na **Obr. 41**. Předepsaná hodnota dle normy **ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov** je pro školní zařízení poslucháren a učeben minimální činitel denního osvětlení  $D_{\min} = 1,5\%$ , průměrný činitel denního osvětlení  $D_m = 5 \%$  a rovnoměrnost 0,2. Nutno podotknout, že zkoumaná oblast v této práci přesahuje bezprostřední okolí prostoru zrakového úkolu, a proto jsou hodnoty pod normativní hranicí. Výstupní protokol výpočtu denního osvětlení je uložen v elektronické příloze pod názvem *Vystupni\_protokol\_denniho\_osvetleni.pdf*. Výpočet osvětlení v místnosti jsem prováděl pro všechny hodnoty řady venkovních osvětlenosti dle **Tab. 4** a pro všechny zkoumané kombinace poloh senzorů a jejich přijímacích charakteristik.

Vypočtené hodnoty:

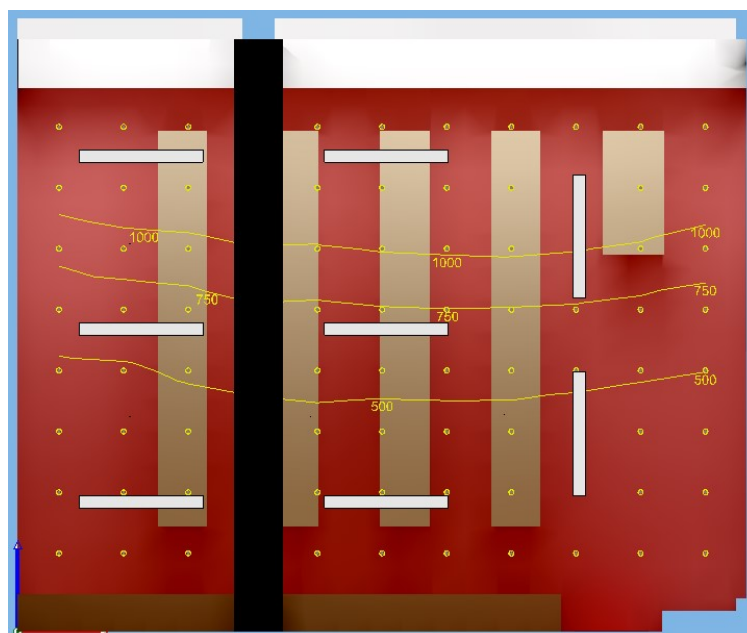
- Venkovní osvětlenost	20 000 lx
- Minimální osvětlenost	313 lx
- Udržovaná osvětlenost	797 lx
- Maximální osvětlenost	1919 lx
- Rovnoměrnost	0,16

Výpočet činitele denního osvětlení:

$$D = \frac{E_m}{E_H} \cdot 100 = \frac{797}{20000} \cdot 100 = 3,985 \% \quad [1.6]$$

kde:  $E_m$  – osvětlení srovnávací roviny v interiéru [lx]

$E_H$  – osvětlení v exteriéru [lx]



Obr. 40 Průběh denní osvětlenosti pro venkovní osvětlenost 20 000 lx



## 6. Optimalizace typů a umístění snímačů

Dnešní trh nabízí nepřeberné množství snímačů osvětlení pro řízení osvětlovacích soustav na konstantní hladinu osvětlenosti. Řada z těchto snímačů obsahuje vestavěný snímač pohybu pro doplňkovou funkci spínání soustavy na základě výskytu osob. V této části diplomové práce se ale budu věnovat pouze senzorům osvětlení, jejich přijímacím charakteristikám a umístění na základě simulace chování soustavy v prostředí modelovacího prostředí BuildingDesign s nastavbami pro výpočet umělého osvětlení Wils a výpočet denního osvětlení Wdls.

### 6.1. Sensory použité při zkoumání chování osvětlovací soustavy

Pro volbu vhodných přijímacích charakteristik jsem provedl průzkum prodáváných čidel na českém trhu a podle nejběžněji používaných přijímacích charakteristik jsem zvolil hodnoty pro výpočet. Základní přehled nejběžnějších čidel prodáváných na českém trhu, jejich způsob komunikace a úhel přijímací charakteristiky je uveden v tabulce **Tab. 3**.

*Tab. 3 Základní přehled čidel osvětlení prodáváných na českém trhu*

Výrobce	Typ	Způsob komunikace	Úhel přijímací charakteristiky
Osram	DUO	1...10 V	110°
	DIM MULTI	1...10 V	110°
	DIM PICO	1...10 V	50°
	DIM MICO	1...10 V	80°
ZUMTOBEL	ED-EYE	DALI	30°
TRIDONIC	basicDIM ILD 5DPI 14f	DALI	60°
	basicDIM ILD 16 DPI 69f	DALI	13°
	SMART senzor 5D 19f	PCA EXCEL one4all	42°
	SMART senzor 5D 19fe	PCA EXCEL one4all	31°
	SMART senzor 10DPI 19fe	PCA EXCEL one4all	38°
BEG	LUXOMAT MiniClip LR-1	1...10 V	140°

Pro simulaci regulace osvětlovací soustavy na konstantní hladinu osvětlenosti v 3D modelu místnosti LPOI302 jsem tedy zvolil hodnoty přijímacích úhlů: **30°**

**60°**

**110°**

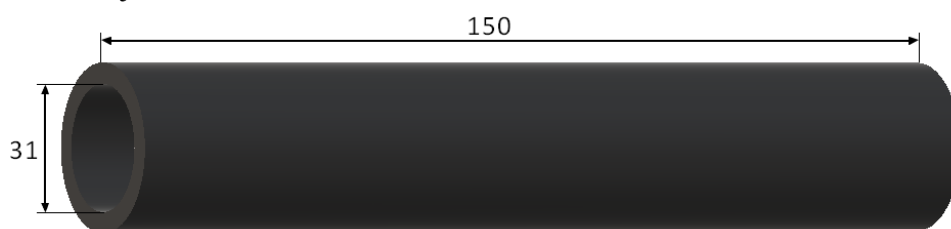
**Kosinovu přijímací charakteristiku**

Stupňování úhlů jsem volil tak, aby bylo názorně vidět, jak ovlivňují různé úhly přijímací vlastnosti čidla osvětlení v dané místnosti a také aby byl pokryt co nejlépe rozsah úhlů v rozsahu od 0° do 180°. Čidlo osvětlení s Kosinovou přijímací charakteristikou, tedy snímající prostorový úhel 180°, se v nabídkách firem nevyskytuje. Bylo však použito pro simulaci jako názorná ukázka, jakým způsobem takovéto čidlo reaguje na změny světelných podmínek v místnosti.

### 6.1.1. Vymodelování konkrétních snímacích úhlů pro senzory

Výpočetní prostředí BuildingDesign poskytuje uživatelům snímač osvětlení pouze s kosinovou charakteristikou. Pro potřeby zúžení přijímací charakteristiky bylo nutné navrhnout stínítko, které omezí prostorový úhel na požadovanou hodnotu. Pro tento účel jsem zkonstruoval 3D model trubice, kterou jsem pomocí importace 3D objektů implementoval do modelované místnosti.

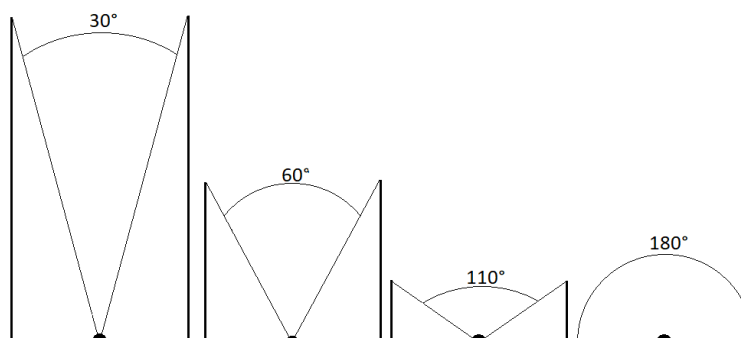
Trubicí jsem v prostředí BuildingDesign definoval černý povrch s odrazností  $\rho = 0 \%$  a nulovým činitelem prostupu světla, díky čemuž jsem zamezil rušivým odrazům či snímáním rušivého světla z širších úhlů, než byly požadovány. Pomocí jednoduchého vzorce jsem poté vypočetl délku přesunutí stínící trubice přes snímací bod pro požadované úhly. Příklad výpočtu hloubky zasunutí snímacího bodu do trubice pro úhel  $60^\circ$  je uveden v rovnici 1.6.



Obr. 41 3D model stínící trubice

$$l = \frac{d}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{31}{2 \cdot \tan\left(\frac{60}{2}\right)} = 26,847 \text{ mm} \quad [1.6]$$

Kde:  $l$  – hloubka zasunutí snímacího bodu do trubice  
 $d$  – průměr vymodelované trubice  
 $\alpha$  – požadovaný prostorový úhel přijímací charakteristiky



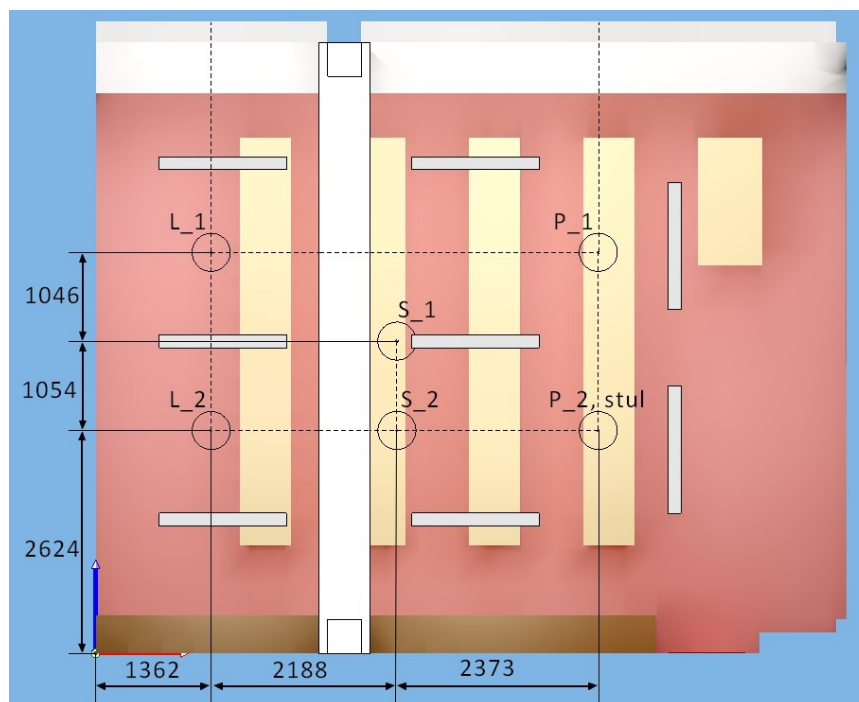
Obr. 42 Náskres jednotlivých případů stínění snímacího bodu trubicí

### 6.1.2. Umístění senzorů v rámci místnosti

Ve zkušebním modelu místnosti LPOI302 jsem zvolil celkem 7 pozic senzorů. Celkem 6 pozic se nachází na stropě ve výšce 3100 mm a jeden je umístěn v rovině stolu ve výšce 750 mm. Pozice senzorů jsou voleny tak, aby co nejlépe vystihly různorodosti světelných podmínek v místnosti vzniklé vlivem přístupu denního světla do místnosti.

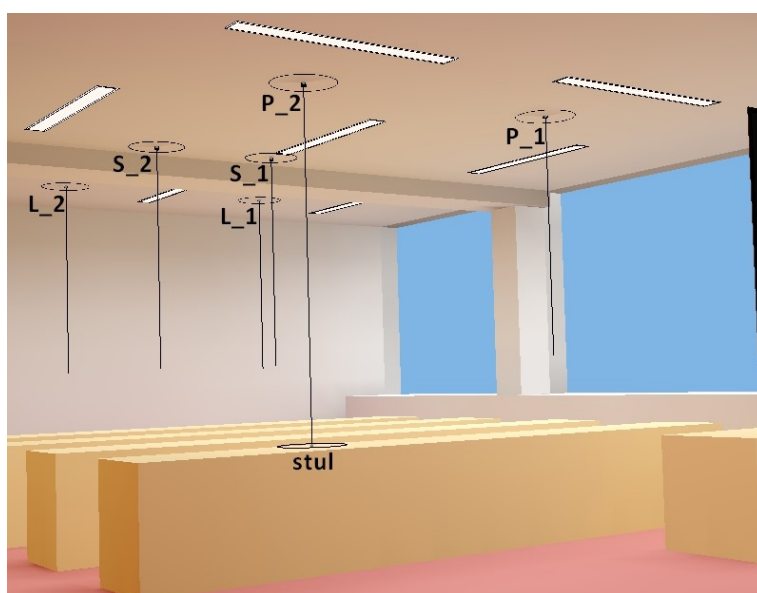
Pozice senzorů L\_1, L\_2, P\_1, P\_2 jsou voleny v osách středů jednotlivých oken tak, že senzory L\_1 a P\_1 jsou umístěny v 1/3 délky místnosti a senzory L\_2 a P\_2 poté ve 2/3 délky místnosti. Tyto pozice jsou vybrány záměrně jako nejvhodnější pozice z hlediska rovnoměrnosti denního světla z obou stran a také jsou tato místa rovnoměrně vzdálená od svítidel.

Naopak pozice ve středu místnosti S\_1 byla navržena jako nejčastější pozice volená při současné instalaci senzorů osvětlení. Jedná se o přibližný střed místnosti s umístěním v ose středové řady svítidel. Pozici S\_2 jsem vybral jako doplňkovou pro porovnání výsledku středového umístění s umístěním v osách středů oken.



Obr. 43 Grafický náčrt pozice senzorů v rámci místnosti LPOI302

Na **Obr. 44** lze vidět jednotlivé pozice senzorů v místnosti. Na pozici P\_2, stul se nachází dva senzory se stejnou polohou lišící se výškovým umístěním, které lze vidět lépe na obrázku **Obr. 45**. Shodná poloha byla vybrána pro snadnější porovnání výsledků se stropním čidlem, kde nevznikne rozdíl způsobený rozdílnou polohou v místnosti.



Obr. 44 3D pohled na rozmístění senzorů osvětlení

## 6.2. Optimalizace umístění senzoru osvětlení

Při modelování chování osvětlovací soustavy jsem jako výchozí hodnotu regulace, a tudíž požadovanou hodnotu udržované hodnoty osvětlenosti v místnosti, zvolil 453 lx. Jedná se o hodnotu udržované osvětlenosti na srovnávací rovině při 100 % výkonu osvětlovací soustavy a nulovém denním osvětlení.

Venkovní osvětlení jsem při modelování zvedal stupňovitě podle řady sepsané v **Tab. 4**. Při nulovém denním osvětlení a 100 % příkonu osvětlovací soustavy jsem pro každou polohu zkalibroval dané čidlo a pomocí hodnoty z tohoto výchozího stavu poté reguloval výkon osvětlovací soustavy pro zvyšující se denní osvětlení.

Tab. 4 Použitá řada venkovních osvětleností

Venkovní osvětlení podle CIE [lx]															
0	50	100	150	200	300	500	750	1500	2000	3000	5000	7500	10000	15000	20000

Z namodelovaných dat jsem vytvořil závislosti udržované osvětlenosti v místnosti na rostoucím venkovním osvětlení a vynesl je do grafu vyobrazeném na **Obr. 46**.

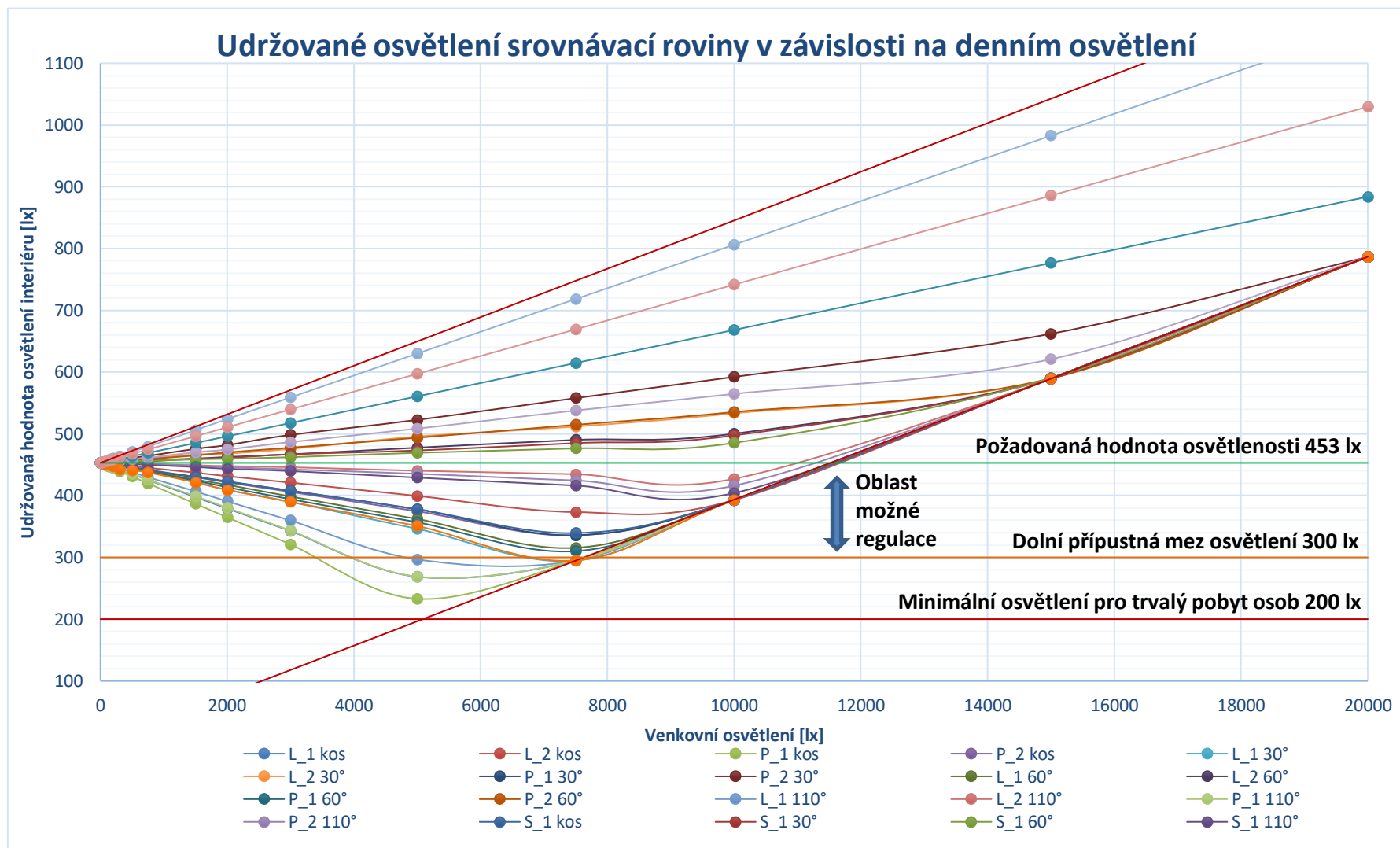
### 6.2.1. Mezní hodnoty při optimalizaci umístění senzoru

V grafu je vyneseno několik mezních hodnot. Jedná se o požadovanou hodnotu osvětlenosti 453 lx, která je pro návrh regulace hraniční. Senzory, které se během regulace dostaly pod tuto hranici, jsou brány jako nevyhovující pro regulaci soustavy. Senzory, které regulují na vyšší hodnotu osvětlenosti, jsou brány jako vyhovující z hlediska regulace osvětlenosti, ale jsou hůře posuzovány v dalších bodech hodnocení, jako například v rámci energetické úspornosti osvětlovací soustavy

Další mezi je hodnota dána zněním normy **ČSN EN 12464-1**, která definuje pro prostory **5.36.1 Učebny, konzultační místnosti** minimální úroveň průměrné osvětlenosti v místě zrakového úkonu 300 lx. V případě stavu osvětlovací soustavy, kdy klesne světelný výkon osvětlovací soustavy, nebude možné regulovat na hodnotu 453 lx, a proto je prostor pro snížení požadované hodnoty osvětlení až po tuto mezní hranici 300 lx. Oblast, ve které se může pohybovat požadovaná hodnota osvětlení, je vyobrazena na **Obr. 46** jako **Oblast možné regulace**.

Nejkritičtější mezi vyobrazenou v grafu je hranice 200 lx, která definuje minimální hodnotu udržované osvětlenosti v místnosti pro trvalý pobyt osob. Trvalým pobytem osob se rozumí pobyt delší než 4 hodiny opakující se vícekrát než jednou týdně. Pod tuto hranici světelné podmínky v místnosti nesmí klesnout za žádných podmínek.

Fyzikálním limitem této regulace jsou také hodnoty: **Dolní limit osvětlení** a **Horní limit osvětlení**. Tyto průběhy vyobrazené na **Obr. 46** znázorňují oblast, ve které je reálné se s danou osvětlovací soustavou pohybovat. Jedná se tedy o dolní hranici osvětlení v místnosti, pod kterou se bez stínění oken nelze při daném venkovním osvětlení dostat a horní hranici osvětlení, kterou nelze překonat z důvodu výkonového limitu osvětlovací soustavy.



Obr. 45 Graf regulace vnitřního osvětlení na konstantní hladinu osvětlenosti pro různé umístění a typy senzorů

### 6.2.2. Tabulky udržované osvětlenosti při regulaci

Následující zdrojové tabulky jsou pouze výňatkem ze zdrojových dat, které jsou kompletně obsaženy v příloze v souboru **zdrojová\_data.xlsx**. Jedná se o 5 umístění senzorů, které nejlépe regulují danou soustavu. Toto pořadí zahrnuje pouze nejlepší výsledek z dané pozice bez ohledu na výsledky dalších úhlů přijímacích charakteristik v dané pozici.

Tab. 5 Tabulka vnitřních udržovaných osvětleností v závislosti na venkovním osvětlení

Umístění:	S_1 60°	L_2 60°	P_2 60°	S_2 60°	Stůl kos. Char.
Venkovní osvětlení	Udržovaná osvětlenost	Udržovaná osvětlenost	Udržovaná osvětlenost	Udržovaná osvětlenost	Udržovaná osvětlenost
[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]
20000	786,7	786,7	786,7	786,7	883,8
15000	590,3	589,8	589,8	620,8	776,6
10000	485,4	500,3	535,3	564,7	668,2
7500	476,4	490,2	514,7	537,8	614,7
5000	469,3	477,6	493,7	508,5	560,7
3000	462,2	466,8	477,6	486,7	517,6
2000	459,7	462,6	470,0	474,6	496,0
1500	458,6	459,8	464,9	470,1	485,2
750	456,4	457,1	459,2	461,4	469,1
500	456,0	455,5	457,2	458,4	463,8
300	454,9	454,3	455,7	456,4	459,3
200	454,2	453,5	454,4	455,2	457,1
150	454,0	452,5	453,8	454,6	456,1
100	453,7	453,3	453,3	454,4	455,1
50	452,5	452,2	453,1	453,4	454,1
0	452,9	452,9	452,9	452,9	452,9

### 6.2.3. Vyhodnocení vhodného umístění senzoru

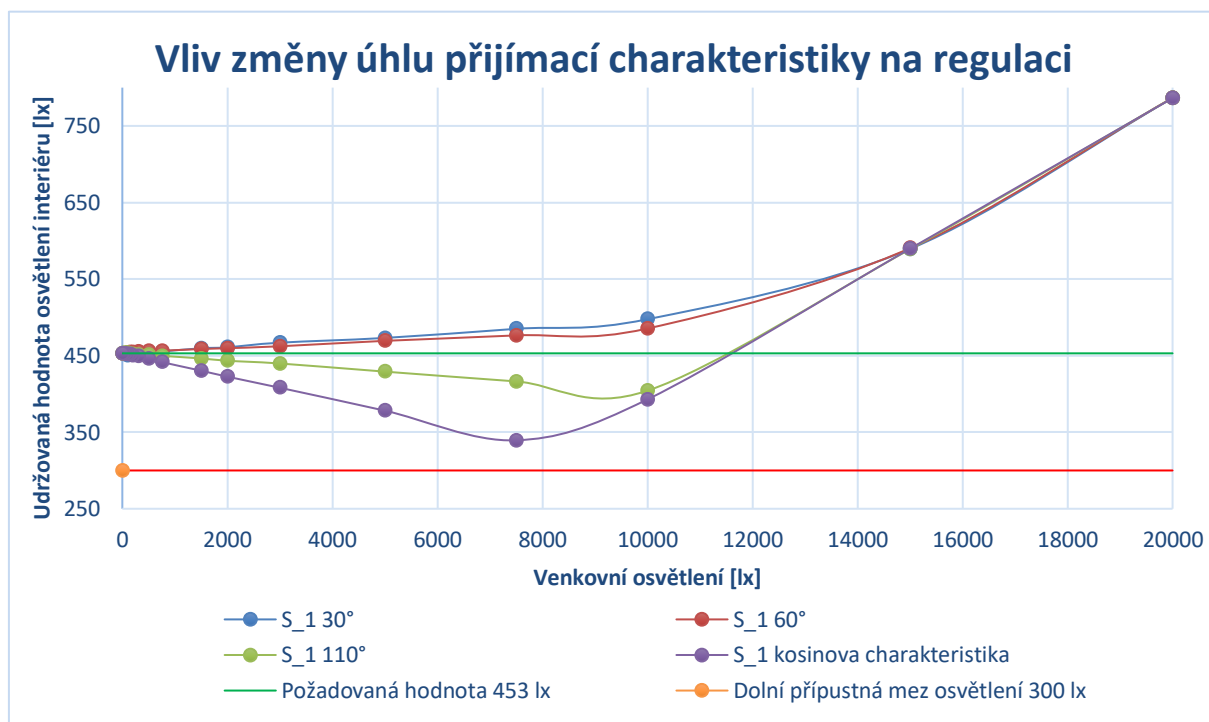
Z grafu na **Obr. 46** můžeme vidět, že ne všechna umístění senzoru osvětlení dokáží poskytovat řídicí informace vedoucí k správné regulaci soustavy.

Z pohledu udržení požadované hodnoty 453 lx při konstantní hodnotě odrazností povrchů vyhovil nejlépe senzor umístěný na pozici S\_1 s přijímacím úhlem 60°. Tento průběh kopíroval požadovanou hodnotu s nejmenší odchylkou. Dále poté vyhověly postupně tyto senzory S\_1 30°, L\_2 60°, L\_2 30° P\_2 60°, S\_2 60°, P\_2 30, stůl kos, stůl 110° a stůl 60°. Ostatní umístění a přijímací charakteristiky jsou nevyhovující, protože během regulace klesla hodnota udržované hodnoty osvětlení pod požadovanou hranici.

Obecně lze tedy říci, že není vhodné umisťovat senzory do blízkosti oken, neboť je poté osvětlovací soustava podregulována a není dosaženo požadované udržované osvětlenosti v místnosti jako celku. Nejvhodnějším umístěním senzoru tedy je střed místnosti nebo vzdálenost 2/3 délky místnosti od oken. Nejvhodnější poloha čidla ale závisí na prostorovém charakteru místnosti.

### 6.3. Optimalizace typu použitého senzoru

Z dat získaných během modelování lze rovněž vyčíst, který přijímací úhel je pro snímání osvětlení v místnosti nejvhodnější. Pro přehlednost vyjme z grafu **Obr. 46** pouze hodnoty senzoru pro polohu S\_1, která vyšla jako nejvhodnější.



Obr. 46 Graf regulace osvětlovací soustavy při změně úhlu přijímací charakteristiky

#### 6.3.1. Vyhodnocení optimálního přijímacího úhlu senzoru

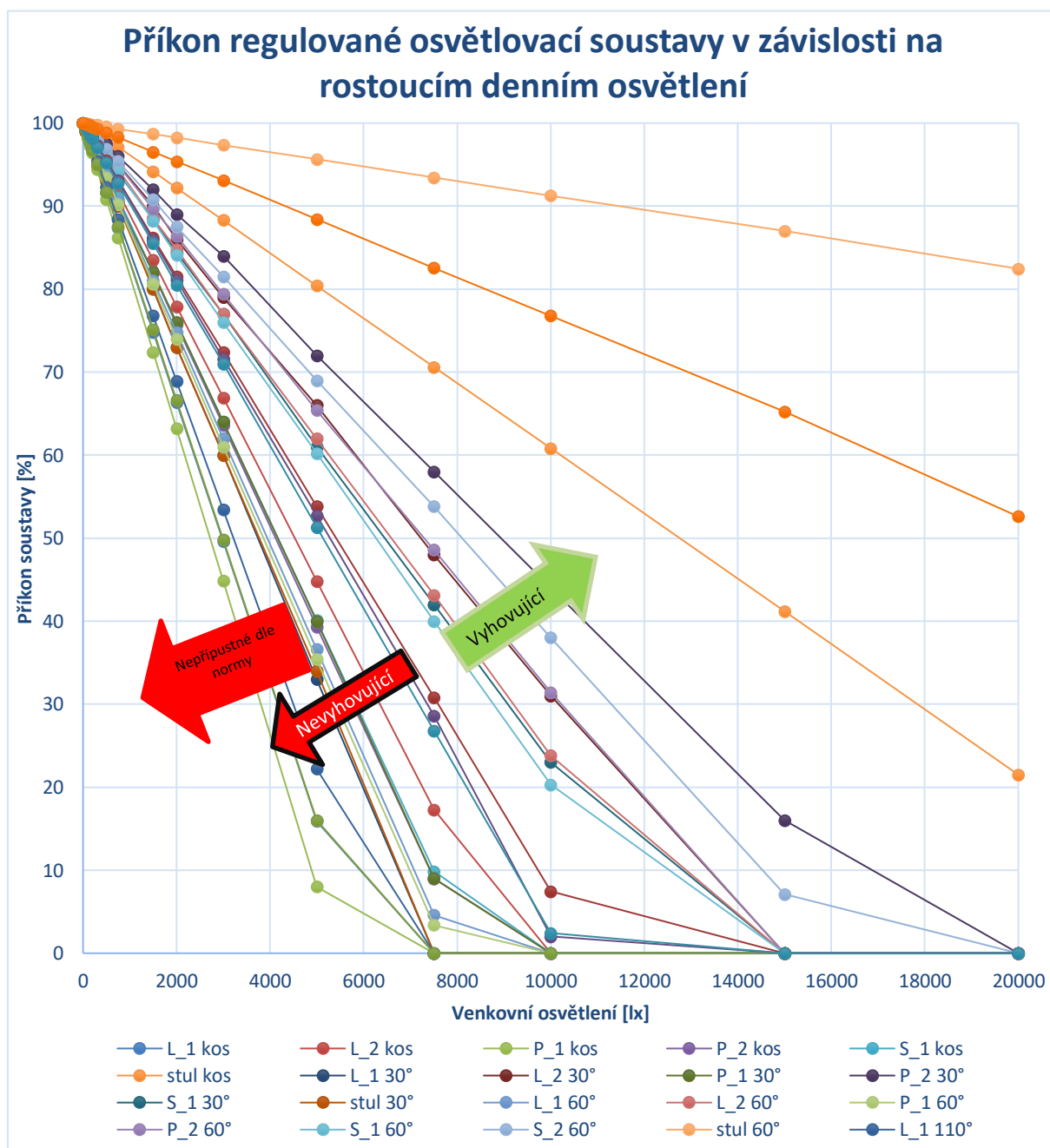
Výsledky pro polohu senzoru S\_1 vyobrazené na **Obr. 47** se principiálně shodují s ostatními polohami na stropě. Nejlepším úhlem přijímací charakteristiky je prostorový úhel 60°. Úhel 30° již místnost přesvětluje, naopak úhel 110° a Kosinova přijímací charakteristika osvětlovací soustavu podregulovávají a osvětlení v místnosti poté nedosahuje požadovaných hodnot.

Nevhodnost širokých přijímacích charakteristik způsobuje přítomnost velkých oken po celé straně místnosti, které tyto čidla částečně oslňují, a ty poté neposkytují věrné informace o stavu osvětlenosti srovnávací roviny. Opačným extrémem je poté přijímací úhel 30°, který naopak díky své malé snímací ploše nedokáže změřit dostatečnou plochu, která by měla vypovídací hodnotu o stavu celé místnosti, a proto jsou jeho výsledky rovněž zkreslené.

Opačným případem je umístění senzoru v úrovni pracovního úkolu se směrem snímání vzhůru. Zde se prokázal opačný trend, a to vhodnost co nejširší přijímací charakteristiky. Ideální je tedy pro umístění senzoru na stůl Kosinova přijímací charakteristika. Senzor na stole snímá většinu světla jako přímo dopadající, proto světlo z oken nezkrusluje skutečný stav osvětlení tak, jako v případě stropního senzoru, který většinu světla snímá jako světlo odražené.

## 6.4. Energetická bilance regulace osvětlovací soustavy

Celkový příkon jednoho svítidla v osvětlovací soustavě udává výrobce v produktovém listě jako  $P = 98 \text{ W}$ . V osvětlovací soustavě máme celkem 8 svítidel. Celkový příkon soustavy je tedy  $P_c = 784 \text{ W}$ . Stávající instalaci osvětlení v místnosti LPOI302 chybí možnost jakékoliv regulace, což umožňuje provozovat osvětlovací soustavu pouze ve 100 % jejího světelného výkonu. Tento způsob provozování osvětlovací soustavy je nejlevnější na vstupní náklady při realizaci, ale velice ztrátový z hlediska dlouhodobého provozování. Snahou investorů je ušetřit co největší množství provozních nákladů, a proto je regulace nezbytná.



Obr. 47 Závislost příkonu regulované osvětlovací soustavy v závislosti na rostoucím denním osvětlení



### 6.4.1. Vybraná zdrojová data

V tabulce Tab. 6 jsou vyňata data pro limitní výsledky ze všech modelovaných druhů regulace. Jedná se o neúspornější regulace těchto požadavků: bez ohledu na normativní požadavky, splňující normu **ČSN EN 12464-1**, minimální udržovaná osvětlenost 453 lx. Pro porovnání jsem přidal data z nejméně úsporné varianty stul 60° a rozdíl mezi nejvhodnější a nejméně výhodnou regulací splňující zvolené kritérium.

Tab. 6 Tabulka příkonů regulované osvětlovací soustavy v závislosti na rostoucím denním osvětlení

	P_1 kos	P_1 60°	S_1 60°	stul 60°	Rozdíl příkonů S_1 60° a stul 60°
Venkovní osvětlení	Příkon soustavy	Příkon soustavy	Příkon soustavy	Příkon soustavy	Příkon
[lx]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
20000	0,00	0,00	0,00	82,45	82,45
15000	0,00	0,00	0,00	87,00	87,00
10000	0,00	0,00	20,30	91,25	70,95
7500	0,00	3,40	40,00	93,42	53,42
5000	8,00	35,40	60,20	95,65	35,45
3000	44,85	61,00	76,00	97,34	21,34
2000	63,20	74,00	84,10	98,25	14,15
1500	72,40	80,60	88,20	98,68	10,48
750	86,20	90,20	94,20	99,30	5,10
500	90,80	93,40	96,30	99,56	3,26
300	94,40	96,20	97,80	99,75	1,95
200	96,40	97,30	98,50	99,80	1,30
150	97,20	98,00	98,90	99,86	0,96
100	98,10	98,80	99,30	99,90	0,60
50	99,20	99,40	99,50	99,94	0,44
0	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00

### 6.4.2. Vyhodnocení příkonů soustavy během regulace

Problematicku energetické náročnosti osvětlovací soustavy lze posuzovat mnoha způsoby. Pro potřeby diplomové práce shrnu modelované výsledky to tří kategorií, a to nejúspornější regulace, nejúspornější regulace splňující normativní požadavky a nejúspornější regulace splňující minimální udržovanou osvětlenost 453 lx stanovenou počáteční podmínkou pro správnou regulaci.

Při pohledu na soustavu pouze jako spotřebič vychází nejúsporněji regulace senzorem na pozici P\_1 s Kosinovou přijímací charakteristikou. Tento pohled je však nepřijatelný z důvodu světelných podmínek v místnosti, neboť účelem soustavy je poskytovat vhodné světelné podmínky v místnosti stanovené normou **ČSN EN 12464-1 – Osvětlování vnitřních pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory**.

V případě hodnocení energetické náročnosti regulace podle normativního požadavku udržovaného osvětlení 300 lx pro prostory kategorie **5.36.1 Učebny, konzultační místnosti** vychází jako

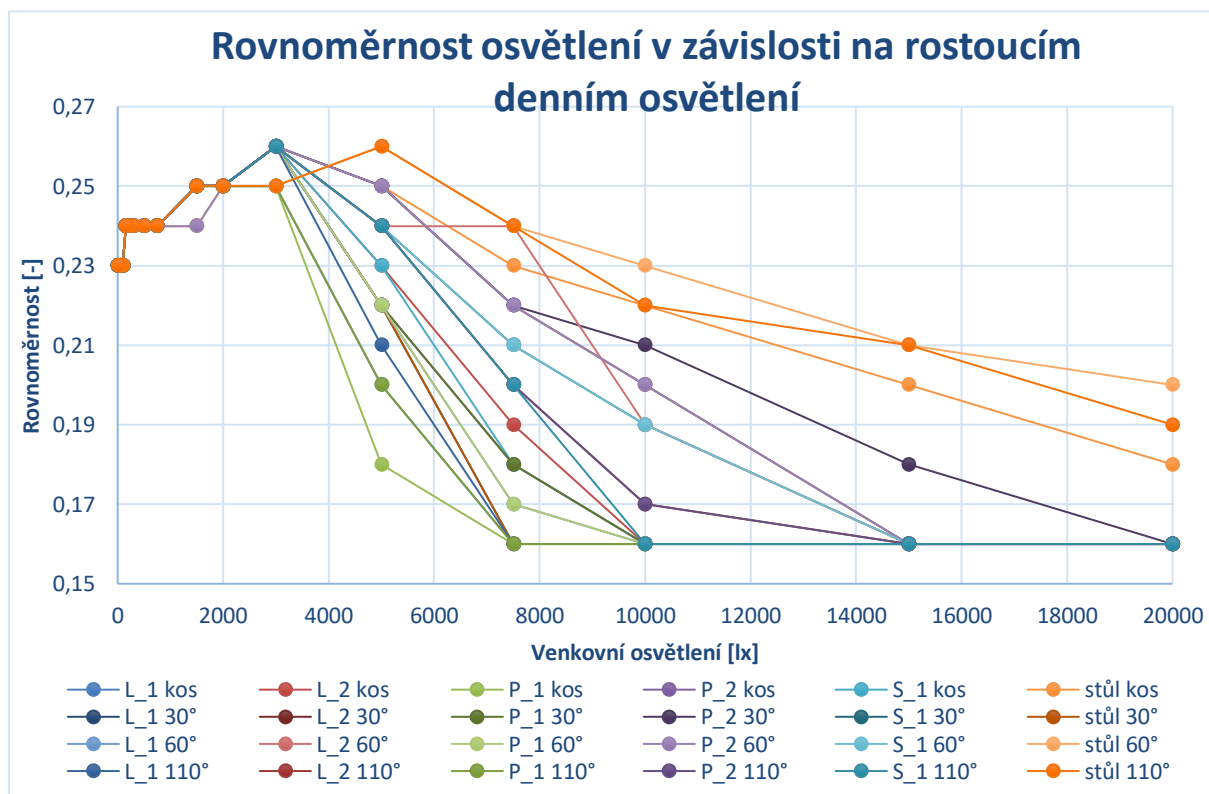
nevyhovující 6 modelovaných průběhů označených v **Obr. 48** červenou šipkou bez ohraničení s nápisem: „nepřípustné dle normy“. Jedná se o senzory osvětlení L\_1 kos, L\_1 110°, L\_1 30°, P\_1 kos, P\_1 110°, stůl 30°. Tyto průběhy regulují pod stanovený normativní limit 300 lx. V případě senzoru osvětlení P\_1 kos jde o pokles pod normativní hranici o 67,2 lx. Nejúčinnější regulací dle zobrazených příkonových křivek splňující normativní požadavky je senzor P\_1 60°.

Při posuzování vhodné regulace osvětlení však byla stanovena podmínka dodržení úrovně udržované osvětlenosti v místnosti 453 lx. Průběhy nesplňující tento požadavek jsou v grafu znázorněny červenou šipkou s černým lemem, naopak průběhy splňující tento požadavek jsou znázorněny zelenou šipkou. Nejúčinnějším způsobem regulace je tedy senzor umístěný ve středu místnosti S\_1 60°.

Z namodelovaných dat lze vidět, že úspory při provozu osvětlovací soustavy při vhodné regulaci dosahují až několika desítek procent. Při porovnání nejúčinnější varianty splňující stanovenou podmínku 453 lx, tedy S\_1 60° s variantou stůl 60°, která vyšla jako nejztrátovější, se při simulované denní osvětlenosti 15000 lx na venkovní nezastíněné ploše je lišil příkon soustavy o 87 %.

## 6.5. Průběhy rovnoměrnosti osvětlení

Důležitým kritériem při návrhu osvětlovací soustavy je rovnoměrnost osvětlení. Jedná se o jeden z hlavních parametrů, které zajišťují zrakovou pohodu. Získaná data nereflektují zcela věrohodně rovnoměrnost osvětlení přímo v místě zrakového úhlu. Síť kontrolních bodů byla pro potřeby získání komplexnějších dat volena po celé ploše místnosti vyjímaje okrajů 0,5 m, a proto je třeba na data pohlížet jako na orientační.



Obr. 48 Rovnoměrnost osvětlení pro jednotlivé druhy regulace

### 6.5.1. Vyhodnocení změn rovnoměrnosti osvětlení

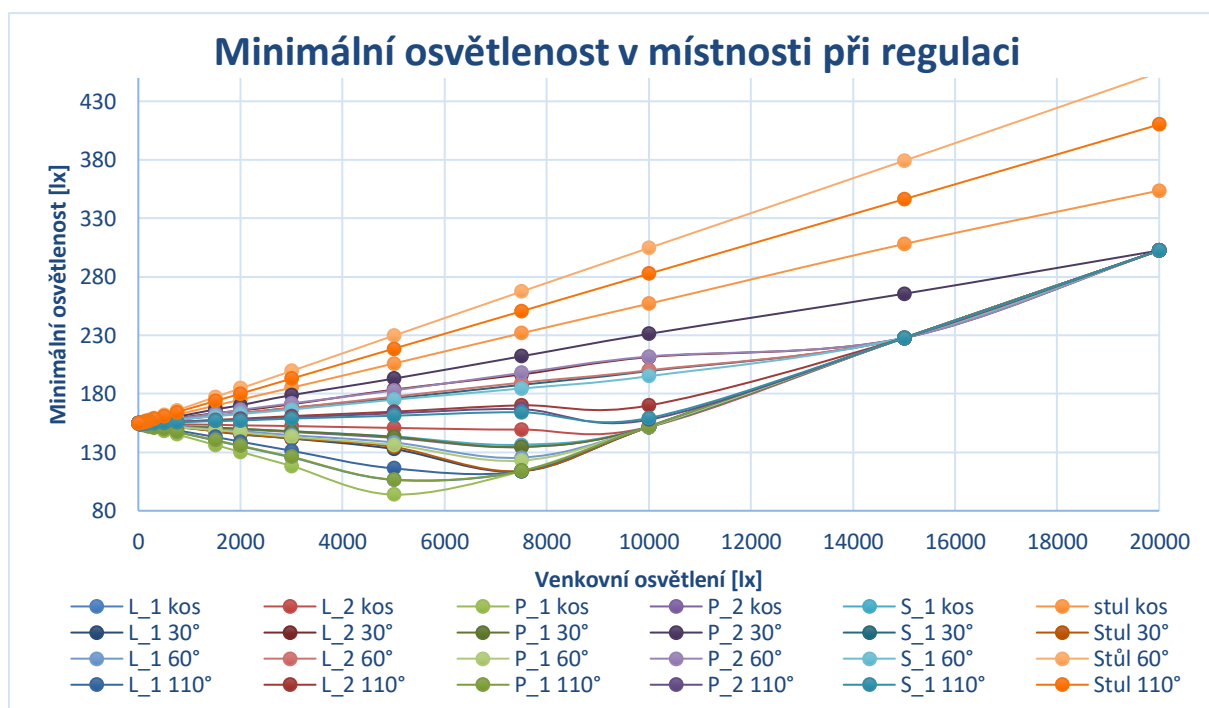
Ze získaných dat lze jasně vidět, že na rovnoměrnost osvětlení v místnosti má největší vliv vzdálenost oken od senzoru osvětlení. Tento jev nastává z důvodu toho, že senzor reguluje světelné podmínky u okna, kdežto na odlehlých stranách místnosti je nedostatek světla.

Nejhorší průběh rovnoměrnosti osvětlení v místnosti tak vykazuje senzor P\_1 kos, který vykazuje při venkovním osvětlení 5000 lx nejnižší hodnotu rovnoměrnosti ze všech senzorů 0,18 a na minimální rovnoměrnost 0,16 klesl při venkovním osvětlení 7500 lx.

Umístění senzoru na stůl vykazuje nejlepší průběhy rovnoměrnosti. S výjimkou přijímací charakteristiky 30° umístění senzoru na stole vyšlo jako nejstabilnější z hlediska rovnoměrnosti osvětlení v místnosti. Senzor stul 60° jako jediný z modelovaných udržel při denní osvětlenosti 20000 lx úroveň rovnoměrnosti 0,2.

## 6.6. Minimální osvětlenosti v místnosti

Namodelované průběhy minimální osvětlenosti v místnosti vyobrazené na **Obr. 50**, přímo souvisí se zjištěnými křivkami rovnoměrnosti při regulaci.



Obr. 49 Minimální osvětlenosti pro jednotlivé druhy regulace

### 6.6.1. Vyhodnocení minimálního osvětlení

Průběhy zcela opisují trend rovnoměrnosti osvětlení pospaný v kapitole 6.5. Nejméně vhodné umístění senzoru z hlediska minimálního osvětlení je v blízkosti oken. Naopak nejvhodnější je umístění na stůl nebo do míst od okna vzdálenějších, jako jsou například pozice L\_2 nebo P\_2.

## 6.7. Vliv změny odrazností povrchů na regulaci soustavy

Při návrhu regulace osvětlovací soustavy se vychází z předpokladu konstantní odraznosti ploch v místnosti. Pro tyto odraznosti se kalibruje senzor osvětlení a ten dále vykonává funkci. Během provozu osvětlovací soustavy však může dojít ke změně těchto odrazností a světelné podmínky v místnosti se skokově změni. Tato změna odraznosti může být například změna nábytku, podlahy či rozdílný nátěr stěn v místnosti.

### 6.7.1. Parametry změn odrazností

Pro ukázkou změny chování osvětlovací soustavy jsem použil zvýšení odrazností povrchů v místnosti. Konkrétně se jedná o zvýšení odraznosti stolů a podlahové krytiny.

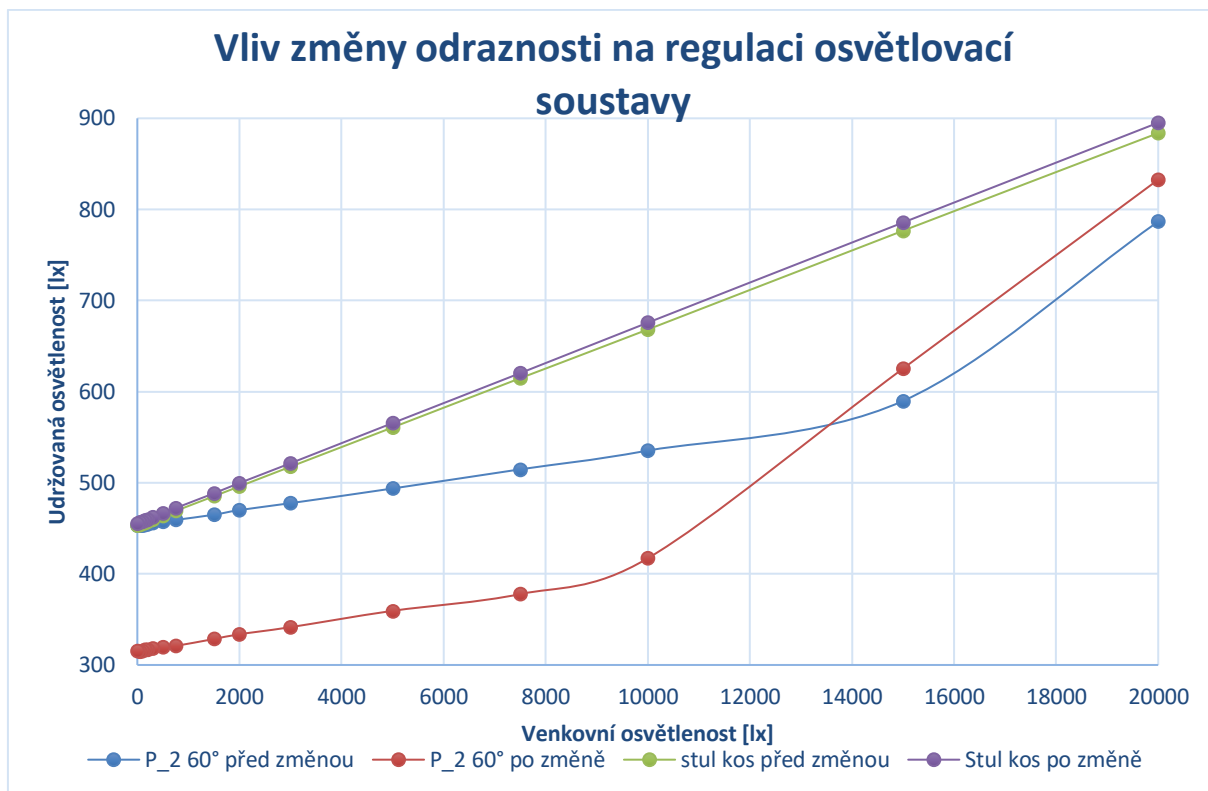
Tab. 7 Tabulka změny odrazností pro jednotlivé objekty

Typ objektu	Původní odraznost	Zvýšená odraznost
Podlaha	0,3	0,4
Školní lavice	0,48	0,8
Katedra	0,48	0,8

### 6.7.2. Vybraná zdrojová data

Tab. 8 Namodelovaná data pro změnu odraznosti objektů v místnosti

	P_2 60° - původní		P_2 60° - po změně		Stul kos. - původní		Stul kos. – po změně	
Venkovní osvětlení	Průměrná osvětlenost	Výkon soustavy	Průměrná osvětlenost	Výkon soustavy	Průměrná osvětlenost	Výkon soustavy	Průměrná osvětlenost	Výkon soustavy
[lx]	[lx]	[%]	[lx]	[%]	[lx]	[%]	[lx]	[%]
20000	786,7	0,0	832,7	0,0	883,8	21,5	895,2	11,2
15000	590,3	0,0	625,3	0,0	776,6	41,2	785,6	32,5
10000	485,4	20,3	417,1	0,0	668,2	60,8	675,7	53,6
7500	476,4	40,0	377,8	14,0	614,7	70,6	620,3	64,2
5000	469,3	60,2	359,4	32,0	560,7	80,4	565,5	74,9
3000	462,2	76,0	341,5	45,8	517,6	88,3	521,4	83,3
2000	459,7	84,1	333,7	53,0	496,0	92,2	499,7	87,6
1500	458,6	88,2	328,5	56,4	485,2	94,2	488,4	89,7
750	456,4	94,2	320,9	61,4	469,1	97,1	472,2	92,9
500	456,0	96,3	319,5	63,3	463,8	98,0	466,5	94,0
300	454,9	97,8	318,4	64,8	459,3	98,8	462,3	94,9
200	454,2	98,5	317,1	65,4	457,1	99,2	459,9	95,2
150	454,0	98,9	316,9	65,8	456,1	99,4	458,9	95,5
100	453,7	99,3	315,7	66,0	455,1	99,6	457,7	95,7
50	452,5	99,5	314,8	66,3	454,1	99,8	456,7	95,9
0	452,9	100,0	315,3	66,8	452,9	100,0	455,5	96,1



Obr. 50 Srovnání udržované osvětlenosti před a po zvýšení odraznosti

### 6.7.3. Vyhodnocení vlivu změny odraznosti

Při zkoumání tohoto jevu jsem použil senzory **P\_2 60°** přisazen ke stropu a **stul kos** upevněný na pracovní desce stolu. Tuto dvojici jsem volil, protože se senzory nacházejí nad sebou, a proto nevznikne zkreslení vlivem polohy. Náhled na pozice jednotlivých senzorů můžete najít na **Obr. 45**.

V případě, že se změní odraznost povrchů v místnosti po kalibraci senzoru osvětlení, bude výsledek regulace oproti požadované hodnotě zkreslen. Senzory umístěné na stropě místnosti reagují na odražené světlo od okolních ploch. Zjednodušeně by se dalo říct, že vyhodnocují jasy odrazových ploch. Díky tomuto jsou stropní senzory velkou mírou ovlivněny odrazností objektů v místnosti. Naopak senzory umístěné v rovině pracovních stolů reagují na přímo dopadající světlo, a proto nejsou tolik odrazností povrchů ovlivněny.

Při zvýšení odraznosti povrchů lze pozorovat, že v případě senzoru P\_2 60° je osvětlovací soustava podregulována. Na začátku regulace, při venkovním osvětlení 0 lx, je rozdíl udržované osvětlenosti 137,6 lx. Podregulování trvá po mez, kdy vnitřní osvětlení zajišťuje pouze světlo z oken. Senzor stul kos má oproti stropnímu senzoru mnohem přesnější regulaci, která se v nejvyšší regulované hodnotě liší o 11,4 lx. Regulace senzorem umístěným na stole má opačný trend a to takový, že je soustava po zvýšení odraznosti nadregulována.

Umístění senzoru na stůl je tedy v případě měnící se odraznosti povrchů příznivější. Z hlediska realizace je tato poloha ovšem nevhodná. Vzniká zde problém s vytvořením prostoru pro senzor a provedení spojení s řídicí jednotkou.

## 7. Závěr

Cílem práce bylo zjistit ideální kombinaci polohy senzoru osvětlení a jeho přijímací charakteristiky pro reálnou místnost LPOI302 sloužící jako učebnu. Pro výpočty jsem použil 3D modelační prostředí BuildingDesign s výpočtovými nadstavbami Wils a Wdls pro výpočet umělého a denního osvětlení. Účelem pro takto namodelované prostředí s regulovatelnou osvětlovací soustavou bylo dodržet požadovanou hodnotu udržované osvětlenosti v místnosti na konstantní hladině 453 lx při konstantní odraznosti ploch.

Toto osvětlení zvládla nejlépe dle kapitoly 6.2.3 regulovat pozice senzoru ve středu místnosti na stropě. Tato poloha je označena v práci jako poloha *S\_1*. Další přijatelné pozice senzorů osvětlení jsou dále umístěné ve 2/3 délky místnosti od oken na pozicích *L\_2* a *P\_2*. Naopak jsem ze získaných dat ověřil, že pozice v blízkosti oken nejsou vhodné z důvodu nízké hladiny osvětlení ve zbylých částech místnosti a z toho plynoucí nedodržení normativních požadavků pro osvětlení celého pracovního prostoru.

Při optimalizaci vhodné přijímací charakteristiky senzorů osvětlení vyšla pro umístění na strop jako nejvhodnější přijímací charakteristika s prostorovým úhlem 60°, dále pak 30°. Širší charakteristiky jsou pro umístění na strop nevhodné, jelikož místnost podregulovávají a nejsou tak dosaženy požadované světelné podmínky. Při použití senzoru v rovině pracovního stolu je trend přijímacích charakteristik opačný a nejlépe pak regulují soustavu senzory s přijímací charakteristikou Kosinovou a 110°. Podrobnější shrnutí výsledků je blíže popsáno v kapitole 6.3.1.

Dalším bodem byla energetická náročnost osvětlovací soustavy popsána v kapitole 6.4.2. Zde záleží na parametru hodnocení, neboť z energetického hlediska lze při dodržení normativních požadavků regulovat na nižší úroveň osvětlenosti a tím výrazně ušetřit náklady na provoz osvětlovací soustavy. Při porovnání nejlépe regulující varianty *S\_1 60°* a nejméně úsporné varianty *stul 60°* dostáváme rozdíl v příkonech osvětlovací soustavy, a tudíž možnou úsporu při vhodném zvolení senzoru, až 87 %.

Z hlediska vyhodnocení rovnoměrnosti osvětlení popsané v kapitole 6.5.1 vyšla nejlépe varianta umístěná na stole s přijímací charakteristikou 60°. Zde má největší vliv na výsledky regulace vzdálenost umístění senzoru od oken. Senzory umístěné v blízkosti oken podregulovávají soustavu a není tak dodržena potřebná rovnoměrnost v rámci celé místnosti.

Z pohledu minimální osvětlenosti v místnosti shrnuté v kapitole 6.6.1 opisují výsledky hodnocení dle regulace konstantní hladiny osvětlenosti. Je zde tedy rovněž nejlepším variantou pozice senzoru *S\_1* s přijímací charakteristikou 60°.

Posledním bodem práce byla simulace chování regulace při změně odraznosti ploch. Podrobné zhodnocení naleznete v kapitole 6.7.3. Pro změnu odraznosti jsem vybral školní lavice, katedru a podlahovou krytinu. Pro demonstraci dopadu změny odraznosti na výsledky regulace jsem zvolil senzory *P\_2 60°* a *stul kos* z důvodu stejného umístění senzorů v rámci místnosti s rozdílnou výškou umístění a jejich orientace. Z výsledků je patrné, že změna odraznosti výrazně ovlivňuje pouze senzor umístěný na stropě, kde byl pokles udržované osvětlenosti během regulace až 137,6 lx, kdežto u senzoru umístěného na pracovním stole pouze 11,4 lx. Toto převážnou měrou ovlivňuje fakt, že senzory

umístěné na stropě reagují na odraženou složku světla, kdežto senzor na stole na složku přímou. Nutno zdůraznit, že umístění na stole je i přes toto zjištění málo používané z důvodů složité realizace umístění senzoru v desce stolu.

Výsledky získané z místnosti LPOI302 nejsou univerzálním ukazatelem vhodného použití senzoru osvětlení, ale je nutno pro každou místnost tuto studii provést samostatně. Ruční simulace je časově velmi náročná a nelze během ní pokrýt všechny možné kombinace umístění senzoru a jeho přijímací charakteristiky. Z tohoto důvodu by bylo přínosné navržení algoritmu pro výpočet vhodné polohy senzoru a jeho přijímací charakteristiky. Program by takto při zadání parametrů místnosti a osvětlovací soustavy automaticky vypočetl vhodný typ a umístění senzoru na základě požadovaného parametru, kterým by dle investora mohla být například regulace na konstantní hodnotu udržované osvětlenosti, hodnotu minimální osvětlenosti, rovnoměrnosti osvětlení nebo regulace podle nejvyšší úspory za elektrickou energii.

## 8. Literatura

- [1] Elektronické předřadníky s funkcí stmívání pro běžné a kompaktní zářivky. *Osram* [online]. Praha: Osram, 2017 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [http://www.osram.cz/osram\\_cz/novinky-a-znalosti/ep/technicke-informace/elektronicke-predradniky-probezne-akompaktnizarivky/elektronicke-predradniky-sfunkci-stmivani-probezne-akompaktni-zarivky/index.jsp](http://www.osram.cz/osram_cz/novinky-a-znalosti/ep/technicke-informace/elektronicke-predradniky-probezne-akompaktnizarivky/elektronicke-predradniky-sfunkci-stmivani-probezne-akompaktni-zarivky/index.jsp)
- [2] DRÁPELA, Jiří. Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť: Disturbing influences of lighting systems to the supply network : zkrácená verze Ph.D. Thesis. [V Brně: Vysoké učení technické], c2007. ISBN 978-80-214-3352-6.:
- [3] ČEPELÍK, Elkovo. Elektronické předřadníky + stmívání. *ELKOVO ČEPELÍK* [online]. Turnov: ELKOVO, 2015 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.elkovo-cepelik.cz/elektronicke-predradniky-stmivani>
- [4] ČEPELÍK, Elkovo. Elektronické předřadníky s funkcí stmívání pro běžné a kompaktní zářivky. *Elkovo Čepelik* [online]. Turnov: ELKOVO, 2016 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.elkovo-cepelik.cz/elektronicke-predradniky>
- [5] Kompaktní zářivka. In: *Http://eshop.elkolighting.cz* [online]. PRAHA: ELKOLIGHTING, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [http://eshop.elkolighting.cz/userdata/images/usporka\\_new.jpg](http://eshop.elkolighting.cz/userdata/images/usporka_new.jpg)
- [6] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [7] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [8] ČSN EN 12464-1. Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory. 2011. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [9] ŠAŠLÍK, Rastislav. V-A charakteristika diody. In: *ARDUINO* [online]. Slovensko: ARDUINO, 2016 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.arduinoaposlovensky.sk/teoria/dioda/?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- [10] YANG, Wu. 3mm Round With Flange Type White LED. In: *GME* [online]. Praha: GMelectronic, 2007, 2007 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.518-269.1.pdf>
- [11] Digitální luxmetr LX-1108. In: *VOLTCRAFT* [online]. Praha: VOLTCRAFT, 2018, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.voltcraft.cz/digitalni-luxmetr-lx-1108.k121885>
- [12] BasicDIM ILD 16DPI 69f. In: *TRIDONIC* [online]. Dornbirn: TIDONIC, 2017, 2017 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.tridonic.com/com/en/products/basicdim-ild-16dpi-69f.asp#tab4>
- [13] Vyzařovací charakteristika. In: *VymenZarovku* [online]. Hradec Králové: Smart-Print, 2015, 2015 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.vymenzarovku.cz/s/waty-lumeny>



- [14] SOKANSKÝ, Karel. *Inteligentní řízení osvětlovacích soustav vnitřního osvětlení* [online]. 2003. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2003 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [http://www.csorsostrava.cz/publikace/inteligentni\\_ridici\\_systemy%20-%202003.pdf](http://www.csorsostrava.cz/publikace/inteligentni_ridici_systemy%20-%202003.pdf)
- [15] *Digital Illumination Interface Alliance* [online]. Piscataway: DALI, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [www.digitalilluminationinterface.org](http://www.digitalilluminationinterface.org)
- [16] VANUŠ, Jan. *KOMPLEXNÍ ŘÍZENÍ BUDOV - PROJEKCE A INSTALACE SBĚRNICOVÝCH SYSTÉMŮ V BUDOVÁCH*. 2014. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3528-0.
- [17] VANUŠ, Jan. *Komplexní řízení budov - základní přehled KNX systémů*. 2014. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3529-7.
- [18] VOJÁČEK, Antonín. KNX/Modbus gateway. In: *HW.cz* [online]. Praha: HW, 2016, 2016 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/test-oplc-unitronics-vision700-s-knxmodbus-gateway.html>
- [19] KUNC, Josef. ABB: Topologické uspořádání KNX/EIB, In: *elektrika.cz* [online]. 2009 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/abb-systemove-elektricke-instalaceknx-eib-2013-10-cast/view>
- [20] *Google Maps* [online]. Mountain View: Google, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps>
- [21] VOIIDA T5. *Hormen* [online]. Praha: Hormen, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://katalog.hormen.cz/technicka-svitidla/voiida/voiida-t5>
- [22] HO 49 W/840. *Osram* [online]. Praha: Osram, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [www.osram.cz](http://www.osram.cz)

## 9. Seznam obrázků

Obr. 1 Kompaktní zářivka s vestavěným předřadníkem [5].....	2
Obr. 2 Samostatný elektronický předřadník [3].....	3
Obr. 3 Volt – Ampérová charakteristika výboje zářivky [6] .....	3
Obr. 4 Základní funkční schéma provozu výbojky [6].....	3
Obr. 5 Blokové schéma elektronického předřadníku [2] .....	4
Obr. 6 Závislost měrného výkonu zářivky na napájecí frekvenci [6] .....	5
Obr. 7 Znázornění střední doby životnosti zářivkových zdrojů [6] .....	6
Obr. 8 Životnost předřadníku v závislosti na pracovní teplotě [7] .....	6
Obr. 9 V-A charakteristika LED diody [9].....	7
Obr. 10 Schéma zapojení LED pásku napájeného napěťovým zdrojem [6] .....	8
Obr. 11 Konstantní proudový zdroj OSRAM Optotronic FIT CS [1].....	8
Obr. 12 Základní zapojení zdroje proudu pro LED diody [6] .....	9
Obr. 13 V-A charakteristika diody v propustném směru [9].....	9
Obr. 14 Regulace proudu proudovým zdrojem.....	10
Obr. 15 Znázornění principu změny střídy při PWM [6] .....	10
Obr. 17 Životnost LED v závislosti na provozní teplotě [6] .....	11
Obr. 18 Hradlový fotoelektrický článek – principiální ukázka konstrukčního uspořádání [6] .....	12
Obr. 19 Průběhy poměrné spektrální citlivosti fotoelektrických článků ve srovnání s $V(\lambda)$ člověka [6] .....	13
Obr. 20 Závislost fotoelektrického proudu na světelném toku při různých odporech vnějšího obvodu [6] .....	13
Obr. 21 Základní konstrukční typy používaných čidel .....	14
Obr. 22 Chyby měření způsobené různými příčinami [6].....	14
Obr. 23 Luxmetr VOLTcraft [11].....	15
Obr. 24 Návrh principiální funkce jasoměru [6] .....	16
Obr. 25 Principiální uspořádání běžného jasoměru [6].....	16
Obr. 26 Čidlo osvětlení TRIDONIC basicDIM ILD 16DPI 69f [12] .....	17
Obr. 27 Příjímací charakteristiky pro různé úhly snímání [13].....	17
Obr. 28 Zapojení osvětlovací soustavy s použitím regulátoru 1-10 V [3] .....	18
Obr. 29 Příklad zapojení osvětlovací soustavy pomocí DALI [14] .....	19
Obr. 30 Ukázka jednotlivých způsobů aplikace DALI systému [14] .....	20
Obr. 31 Označení původního standardu DALI a nové verze DALI-2 [15].....	21
Obr. 32 Princip sběrnice KNX [17].....	21
Obr. 33 Oblast využití sběrnice systému KNX v budovách [18] .....	22
Obr. 34 Stromová topologie systémů KNX [19] .....	23
Obr. 35 Letadlový snímek umístění budovy v rámci Fakulty stavební VŠB – TU Ostrava [20] .....	24
Obr. 36 Ukázka reálné místnosti a 3D modelu .....	25
Obr. 37 Svítidla instalována v místnosti LPOI302 [21] .....	25
Obr. 38 Situační náhled umístění svítidel v místnosti .....	26
Obr. 39 Ukázka popisu zářivky Osram HO 49W/840 [22] .....	28
Obr. 40 Rozložení umělého osvětlení v místnosti LPOI302 .....	29
Obr. 41 Průběh denní osvětlenosti pro venkovní osvětlenost 20 000 lx .....	30
Obr. 42 3D model stínící trubice .....	32
Obr. 43 Návrh jednotlivých případů stínění snímacího bodu trubice.....	32
Obr. 44 Grafický návrh pozice senzorů v rámci místnosti LPOI302.....	33
Obr. 45 3D pohled na rozmístění senzorů osvětlení.....	33

<i>Obr. 46 Graf regulace vnitřního osvětlení na konstantní hladinu osvětlenosti pro různé umístění a typy senzorů</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 47 Graf regulace osvětlovací soustavy při změně úhlu přijímací charakteristiky .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 48 Závislost příkonu regulované osvětlovací soustavy v závislosti na rostoucím denním osvětlení .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 49 Rovnoměrnost osvětlení pro jednotlivé druhy regulace .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 50 Minimální osvětlenosti pro jednotlivé druhy regulace .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 51 Srovnání udržované osvětlenosti před a po zvýšení odraznosti .....</i>	<i>43</i>

## 10. Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Shrnutí požadavků na Luxmetry a Jasoměry pro jednotlivé typy použití [6].....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 Volené odraznosti povrchů v místnosti LPOI302 .....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3 Základní přehled čidel osvětlení prodávaných na českém trhu .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4 Použitá řada venkovních osvětleností .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 5 Tabulka vnitřních udržovaných osvětleností v závislosti na venkovním osvětlení .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6 Tabulka příkonů regulované osvětlovací soustavy v závislosti na rostoucím denním osvětlení.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7 Tabulka změny odrazností pro jednotlivé objekty .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 8 Namodelovaná data pro změnu odraznosti objektů v místnosti.....</i>	<i>42</i>

# 11. Seznam příloh

## Elektronická příloha CD

Obsah CD:

Zdrojový soubor modelu místnosti:	<i>mistnost_LPOI302.bdg</i>
Katalogový list svítidla:	<i>voiiida_t5.pdf</i>
Katalogový list zářivky:	<i>ZMP_60197_HO_49_W_840.pdf</i>
Protokol denního osvětlení:	<i>Vystupni protokol denního osvětlení.pdf</i>
Protokol umělého osvětlení:	<i>Vystupni protokol umele osvetleni.pdf</i>
Vypočtené hodnoty:	<i>Zdrojova_data.xlsx</i>